Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

Risikofaktoren für postoperative Komplikationen nach lumbosakralen Fusionen

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität Köln

vorgelegt von
Daniel Joebges
aus Viersen

promoviert am 20. Oktober 2023

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
Druckjahr 2023

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Privatdozent Dr. med. M. J. Scheyerer
2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. S. Fürderer

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen.

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Patientenakten und radiologischen Bilder wurden ohne meine Mitarbeit in der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Uniklinik Köln zur Verfügung gestellt.

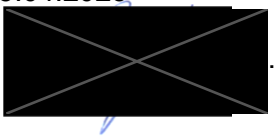
Die in dieser Arbeit angegebenen Messungen sind nach entsprechender Anleitung durch Herrn PD Dr. Max J. Scheyerer von mir selbst ausgeführt worden.

Die verwendeten Patientenakten und radiologischen Bilder wurden von mir selbst ausgewertet.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 25.04.2023

Unterschrift .....

Danksagung

Ich möchte meiner Partnerin Charlotte für ihre stetige Unterstützung und Motivation, insbesondere in den letzten Zügen dieser Arbeit danken.
Auch gilt mein Dank meinen Eltern, die mich auf meinem schulischen, akademischen und beruflichen Weg immer bedingungslos unterstützt haben.

Besonders bedanke ich mich bei Privat-Dozent Dr. med. Max J. Scheyerer, welcher mir nicht nur als Betreuer und schließlich Doktorvater während dieser Arbeit zur Seite stand, sondern auch meinen beruflichen Werdegang an der Uniklinik Köln geprägt hat. Er ist in vielerlei Hinsicht ein Vorbild für mich.

Bedanken möchte ich mich auf bei Herrn Universitätsprofessor Dr. med. Peer Eysel, Herrn Universitätsprofessor Dr. med. Lars-Peter Müller und allen (ehemaligen) Kolleginnen und Kollegen, die mich während meiner Zeit an der Uniklinik begleitet haben. Ich blicke auf einen prägenden, lehrreichen und freudigen Abschnitt meines beruflichen Weges zurück.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 6

1 ZUSAMMENFASSUNG 7

2 EINLEITUNG 8

2.1 Einführung in die Thematik 8

2.2 Anatomie der Wirbelsäule und des lumbosakralen Übergangs 9

2.3 Pathologien der Wirbelsäule 12

2.4 Operative Eingriffe am lumbosakralen Übergang 15
2.4.1 Dorsale Instrumentierung 15
2.4.2 Posteriore lumbale interkorporale Fusion (PLIF) 16
2.4.3 Transforaminale lumbale interkorporale Fusion (TLIF) 16
2.4.4 Anteriore lumbale interkorporale Fusion (ALIF) 17

2.5 Komplikationen nach operativen Eingriffen am lumbosakralen Übergang 17
2.5.1 Pseudarthrose 17
2.5.2 Adjacent segment disease (ASD) 19
2.5.3 Schraubenlockerung 20

2.6 Fragestellung und Ziel der Arbeit 21

3 MATERIAL UND METHODEN 22

3.1 Patientenkollektiv 22

3.2 Datenerhebung 22
3.2.1 Erhebung patientenspezifischer Daten 23
3.2.2 Erhebung operationsbezogener Daten 23
3.2.3 Erhebung anatomischer Daten 25
3.2.4 Komplikationen 31

3.3 Datenauswertung 31

4 ERGEBNISSE 33

4.1 Darstellung des Gesamtkollektivs 34

4.2 Deskriptive Statistik – Vorliegen einer Langzeitkomplikation 36

4.3 Deskriptive Statistik - Pseudarthrose 39

4.4 Deskriptive Statistik - ASD 43

4.5 Deskriptive Statistik - Schraubenlockerung 47

4.6 Hypothesentests 51

5 DISKUSSION 53

5.1 Pseudarthrose 53

5.2 ASD 55

5.3 Schraubenlockerung 57

5.4 Gemeinsame Risikofaktoren und Limitierungen 59

6 LITERATURVERZEICHNIS 61

7 ANHANG 72

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anterior-posterior
ASD	Adjacent segment disease
ALIF	Anteriore lumbale interkorporale Fusion
BMI	Body-Mass-Index
BWK	Brustwirbelkörper
BWS	Brustwirbelsäule
bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomographie
Diff.	Differenz
Fa.	Firma
ggf.	gegebenenfalls
GWS	Ganze Wirbelsäule
HU	Hounsfield-Unit
HWS	Halswirbelsäule
i.d.R.	In der Regel
Lig.	Ligamentum
LWK	Lendenwirbelkörper
LWS	Lendenwirbelsäule
MRT	Magnetresonanztomographie
NSAID	non-steroidal anti-inflammatory drug
OP	Operation
PLF	Posterior/posterolateral lumbar fusion
PLIF	Posteriore lumbale interkorporale Fusion
SWK	Sakralwirbelkörper
TLIF	Transforaminale lumbale interkorporale Fusion
Vs.	Versus
WK	Wirbelkörper
WS	Wirbelsäule

1 Zusammenfassung

Rückenschmerzen sind in den Industrienationen einer der häufigsten Gründe, einen Arzt zu konsultieren[1]. Neben unspezifischen Rückenschmerzen ohne klare Ursache liegen in ca. 10 Prozent der Fälle spezifische Rückenschmerzen vor, welche auf degenerative Veränderungen, Frakturen, Tumoren, entzündliche Prozesse und weitere Pathologien zurückzuführen sind und mitunter einer operativen Therapie bedürfen[2-4]. Eine Möglichkeit besteht in einer lumbosakralen Fusionsoperation, welche in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat[5]. In der Folge dieser Eingriffe kann es zu postoperativen Komplikationen wie Pseudarthrosen, Schraubenlockerungen oder Pathologien im Anschlusssegment (ASD) kommen, die zu einem schlechteren klinischen Ergebnis führen können[6,7].

Sowohl vorbestehende Umstände, die den Gesundheitszustand Patienten betreffen, aber auch biomechanische Aspekte sowie durch den Operateur während des Eingriffs beeinflussbare Aspekte können hierbei das Auftreten einer dieser Komplikationen begünstigen[8-12]. Ziel dieser Arbeit war es, weitere mögliche Risikofaktoren zu identifizieren. Hierzu wurden im Rahmen einer retrospektiven Analyse die Daten von 100 Patienten ausgewertet. Neben patientenspezifischen Parametern, wie beispielsweise Alter, Geschlecht, oder Vorerkrankungen wurden operationsbezogene Faktoren, etwa Art der Fusion, Art und Lage der Implantate oder Ausmaß der Dekompression erhoben. Zudem wurden anhand von Bilddatensätzen anatomische Daten, beispielsweise die spinopelvinen Parameter, Hounsfield-Einheiten der adressierten Wirbelkörper oder Veränderungen der Bandscheiben sowie der Deck- und Grundplatten ermittelt. Die Daten wurden mittels deskriptiver Statistik ausgewertet. Für die Variablen, welche entsprechende Voraussetzungen erfüllten, wurden zudem Hypothesentests durchgeführt.

Es konnten einige Faktoren ermittelt werden, welche mit dem Auftreten von allen der genannten Komplikationen vergesellschaftet sind. Hierzu gehören vor allem das Vorliegen chronischer Erkrankungen, multisegmentale Eingriffe, degenerative Veränderungen der Bandscheiben, Wirbelkörper und umliegenden Muskulatur, ein höheres Alter oder Eingriffe, die eine Revision darstellen. Statistisch signifikante Ergebnisse in Bezug auf einzelne Komplikationen zeigen sich für Veränderungen der Deck- und Grundplatten, die Länge der intraossären Schraubenlage, die Höhe der Bandscheibe im adressierten Segment, das Patientenalter und die Hounsfield-Einheiten im 1. Sakralwirbelkörper. Der retrospektive Ansatz der Arbeit sowie die fehlende Verblindung und teils eingeschränkte Datenlage limitieren die Studie.

2 Einleitung

2.1 Einführung in die Thematik

Rückenschmerzen stellen in Industrienationen neben grippalen Infekten einen der häufigsten Gründe für eine ärztliche Konsultation dar. So geben beinahe 90 Prozent aller Erwachsenen an, mindestens einmal in ihrem Leben unter einer solchen Symptomatik zu leiden. Wiederum 10 Prozent berichten, solche Beschwerden innerhalb der letzten drei Monate verspürt zu haben[1]. Die 1-Jahresprävalenz in Deutschland wird in einer Arbeit von Schmidt et al. aus dem Jahr 2007 mit 76 Prozent angegeben, die Punktprävalenz betrug ca. 37 Prozent[13].

Damit geht eine nicht unerhebliche volkswirtschaftliche Belastung einher. Berechnungen aus dem Jahr 2006 zufolge betrugen die jährlichen Kosten, welche auf Rückenschmerzen zurückzuführen sind, ca. 35 Milliarden Euro. Diese inkludieren sowohl Therapiekosten als auch Kosten, die durch Arbeitsunfähigkeit sowie Produktionsausfälle entstehen[14]. Insbesondere Schmerzen des unteren Rückens stehen hierbei im Vordergrund und sind die häufigste Ursache für Arbeitsunfähigkeit und Produktivitätseinbußen[2].

Mit 90 Prozent liegen in den meisten Fällen unspezifische Rückenschmerzen vor, bei denen keine klare Ursache gefunden werden kann und grundsätzlich eine günstige Prognose besteht[3].

Ursächlich für spezifische Rückenschmerzen sind neben degenerativen Veränderungen auch Frakturen, Deformitäten, Tumoren sowie entzündliche Prozesse. Hier kann unter Umständen eine operative Therapie notwendig sein[4]. Zu den operativen Therapieoptionen gehören neben rein dekomprimierenden Eingriffen auch stabilisierende Eingriffe, zu denen auch lumbale Fusionsoperationen gehören. Letztere wurden in den vergangen Jahren – insbesondere aufgrund degenerativer Veränderungen – immer häufiger durchgeführt[5].

Unglücklicherweise treten nach solchen Eingriffen Komplikationen wie Pseudarthrosen, Schraubenlockerungen und Pathologien im Anschlusssegment (ASD, Adjacent segment disease) auf, welche mit einem schlechteren klinischen Ergebnis einhergehen können[6,7]. In dieser Arbeit werden diese Komplikationen nach Eingriffen am lumbosakralen Übergang näher betrachtet.

2.2 Anatomie der Wirbelsäule und des lumbosakralen Übergangs

Die Wirbelsäule bildet die zentrale Struktur des menschlichen Rumpfskeletts. Sie besteht aus Wirbeln, welche durch Zwischenwirbelgelenke, Bandscheiben und Bänder flexibel miteinander verbunden sind. Dadurch lässt sie neben ihrer stützenden Funktion ein hohes Maß an Bewegung zu.

Die Wirbelsäule des Erwachsenen wird in mehrere Abschnitte gegliedert, welche aus einer unterschiedlichen Anzahl von Wirbeln bestehen:

- die Halswirbelsäule (HWS) mit 7 Wirbeln
- die Brustwirbelsäule (BWS) mit 12 Wirbeln
- die Lendenwirbelsäule (LWS) mit 5 Wirbeln
- die Sakralwirbelsäule mit 5 zum Kreuzbein bzw. Sakrum fusionierten Wirbeln
- das Steißbein mit 3-5 fusionierten Wirbeln[15]

Dabei sind in der Sagittalebene vier typische Krümmungen erkennbar. Während in der Hals- und Lendenwirbelsäule eine Lordose vorliegt, weisen Brust- und Sakralwirbelsäule eine Kyphose auf. In einer Arbeit von Berthonnaud et al. wurden seitliche Röntgenaufnahmen von 160 asymptomatischen, jungen Erwachsenen ausgemessen und Mittelwerte für die oben genannten Krümmungen berechnet. So lag die mittlere zervikale Lordose bei 23,9°, die thorakale Kyphose bei 47,54° und die lumbale Lordose bei 42,69°[16].

Ein Wirbel besteht aus Wirbelkörper, Wirbelbogen, einem Dornfortsatz, zwei Querfortsätzen sowie vier Gelenkfortsätzen.

Der ventral gelegene Wirbelkörper besteht aus einer äußeren Schicht aus kortikalem Knochen, welche die innenliegende Spongiosa umgibt. Nach kranial wird der Wirbelkörper durch die Deckplatte und nach kaudal durch die Grundplatte begrenzt. Der Körper ist der Teil des Wirbels, auf den die größte Kraft wirkt. Die Größe der Wirbelkörper nimmt innerhalb der Wirbelsäule nach kaudal zu. Dorsal grenzt an den Wirbelkörper der Bogen. Dieser besteht aus den Pedikeln, welche ventral der nach lateral ragenden Querfortsätze liegen, und der Lamina, die entsprechend dorsal davon liegt und diese mit dem Dornfortsatz verbindet. Letzterer ragt nach dorsal/kaudal. Je ein oberer und unterer Gelenkfortsatz auf beiden Seiten bildet mit dem entsprechenden Gelenkfortsatz des darüber bzw. darunter gelegenen Wirbels ein Wirbelbogen- oder auch Facettengelenk. Ähnlich den Wirbelkörpern nimmt die Größe der Dorn- und Querfortsätze innerhalb der LWS nach kaudal zu. Zwischen Wirbelkörper und Wirbelbogen liegt der Spinalkanal, welcher das Rückenmark beinhaltet[17,18].

Die Lendenwirbel sind ebenso wie die Wirbel der übrigen Wirbelsäule von ligamentären und muskulären Strukturen umgeben.
Vor bzw. hinter dem Wirbelkörper liegt das vordere bzw. hintere Längsband (Lig. longitudinale anterius / posterius). Zwischen den Wirbelbögen verläuft das Lig. flavum, während sich zwischen den Wirbelfortsätzen das beidseitig angelegte Lig. intertransversarium sowie das Lig. interspinosum befindet[19].
Seitlich der Dornfortsätze verläuft die autochthone Rückenmuskulatur, die auch als Musculus errector spinae bezeichnet wird. Diese umfasst sämtliche Muskeln, die durch die Rami dorsales der Spinalnerven innerviert werden. Die Muskeln verlaufen im Bereich der LWS schräg und vertikal zwischen den Quer- und Dornfortsätzen[20].

Das kaudal an die Lendenwirbelsäule angrenzende Sakrum ist ein dreiecksförmiger Knochen, der in den ersten 25 bis 33 Lebensjahren aus fünf Sakralwirbeln zusammenwächst. Zwischen der Vorderfläche und der Hinterfläche verläuft der Canalis sacralis, in dem das Rückenmark verläuft. Über jeweils acht Foramina treten Nerven nach dorsal und ventral aus.
Der kraniale Teil des Sakrums, auch Basis oder Sakralwirbelkörper 1 genannt, grenzt an den 5. Lendenwirbelkörper. Nach lateral geht die Basis in die beidseitige Ala ossis sacri über. Die beiden Gelenkfortsätze, die über kurze, dicke Pedikel mit dem SWK 1 und der Ala verbunden sind, artikulieren entsprechend mit den unteren Gelenkfortsätzen der LWK 5. Nach lateralen bildet die Facies auricularis bildet einen Teil des Kreuzbein-Darmbein-Gelenks[21].

Zwischen den Wirbelkörpern liegen die Bandscheiben, auch Zwischenwirbelscheiben oder Dicus intervertebralis genannt. Diese bestehen aus einem zentralen gallertartigem Kern, welcher von einem kollagenfaserhaltigem Anulus fibrosus umgeben wird. Die äußeren Schichten des Anulus fibrosus gehen nach ventral und dorsal in das vordere bzw. hintere Längsband und nach kranial und kaudal in den Gelenkknorpel der Grund- bzw. Deckplatte der angrenzenden Wirbelkörper über. Durch diese flexible Verbindung der Wirbelkörper wird die Bewegung zwischen benachbarten Wirbelkörpern möglich[22].

Solche Bewegungen spielen sich innerhalb eines Bewegungssegments ab. Diese umfassen benachbarte Wirbel, die dazwischengelegene Bandscheibe, die Wirbelbogengelenke sowie die dazugehörigen weichteiligen Strukturen wie Bänder, Muskeln, Gefäßen und Nerven[23].

Das sagittale Profil des Wirbelsäule wird neben den o.g. Lordosen und Kyphosen zudem durch das Lot, welches von der Mitte des 7. Halswirbelkörpers fällt, charakterisiert. Bei asymptomatischen Menschen mittleren und älteren Alters verläuft dieses im Mittel 3,2 cm kaudal des Vorderrand des Sakrums, wie Geld et al. es in einer Studie mit 100 Freiwilligen beschrieben[24]. Dieses Lot spielt eine maßgebliche Rolle bei der Betrachtung der sagittalen Balance, auf die im weiteren Verlauf dieses Kapitels eingegangen wird.

Einen erheblichen Einfluss auf das sagittale Profil der Wirbelsäule nimmt die Stellung des Beckens ein, was auf die besondere Bedeutung des lumbosakralen Übergangs schließen lässt. Im Verlauf wurde durch J. Legaye im Jahr 1998 die Pelvic incidence beschrieben. Dieser Parameter ist definiert als der Winkel zwischen zwei Linien: Die erste Linie reicht vom Mittelpunkt der sakralen Deckplatte im rechten Winkel zu dieser nach distal, die zweite verläuft vom o.g. Mittelpunkt zur Achse, welche beide Femurköpfe verbindet. Es handelt sich um einen individuellen, von der Lage des Beckens im Raum unabhängigen Parameter, der die Position des Sakrums im Becken beschreibt.

Daneben werden weitere pelvine oder auch spinopelvine Parameter beschrieben (vgl. Abbildung 1: Die Sakrumkippung (sacral slope) ist definiert als Winkel zwischen der Deckplatte des Sakrums und der Horizontalen. Die Beckenkippung (pelvic tilt oder pelic tilting) wird durch den Winkel zwischen der Verbindungslinie vom Mittelpunkt der sakralen Deckplatte und der Achse der Femurköpfe und der Vertikalen. Diese beiden Parameter sind anders als die Pelvic incidence nicht konstant sondern von der Stellung des Beckens im Raum abhängig und werden durch Haltung des Rumpfes sowie der unteren Extremitäten beeinflusst. Ebenso davon beeinflusst werden die lumbale Lordose, als Winkel zwischen BWK 12 und LWK 5 sowie die thorakale Kyphose als Winkel zwischen BWK 1 und BWK 12. Daneben wird der sogenannte Overhang beschrieben, welcher als Abstand zwischen der Achse durch die Femurköpfe und dem vom Mittelpunkt der sakralen Deckplatte ausgehenden Lot definiert ist[25].

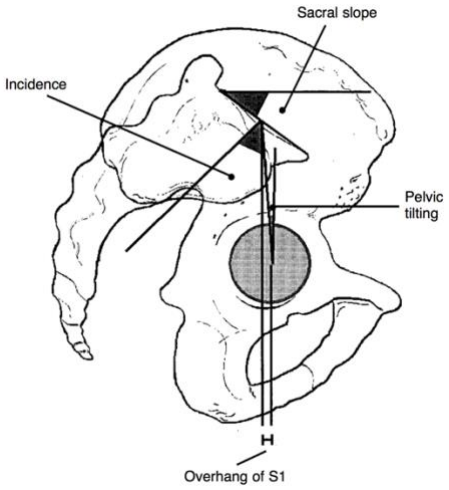


Abbildung 1: Spinopelvine Parameter
Quelle: Legaye et al. 1998

Die sagittale Balance ist ein Zustand, in dem die Wirbelsäule in einer solchen Stellung ist, dass die wenig-möglichste Kraft benötigt wird, diese Stellung beizubehalten, da die Lastachse in der optimalen Position verläuft[26].

Im Laufe des Lebens kommt es durch verschiedene degenerative Prozesse zu einer weniger ausgeprägten Lordose oder gar Kyphose der Lendenwirbelsäule, sodass sich das o.g. vom 7. Halswirbelkörper ausgehende Lot (C7-Lot) nach ventral verschiebt. Verschiedene Kompensationsmechanismen bewirken, dass sich dieses Lot wieder nach dorsal verlagert. Dazu gehören zum Beispiel eine Rückneigung des Beckens, eine Hyperextension der LWS, eine Reduktion der thorakalen Kyphose oder eine Flexion in den Knien. So kann neben einem balancierten und unbalancierte sagittalen Profil eine kompensierte Balance vorliegen. Die Einteilung erfolgt durch Berechnungen, die das C7-Lot, die Pelvic incidence, den Spino-Sakralen-Winkel sowie den Sakro-Femoralen-Abstand berücksichtigen. Kompensationsmechanismen können auf der einen Seite zwar zu einer Aufrechterhaltung des sagittalen Balance führen, auf der anderen Seite jedoch zur anderen Beschwerden wie Schmerzen oder neurologischen Ausfällen führen und müssen so bei der Therapie von Patienten mit Wirbelsäulenpathologien berücksichtigt werden[27,28].

2.3 Pathologien der Wirbelsäule

Wie bereits erwähnt ist die häufigste Form des Rückenschmerzes der unspezifische Rückenschmerz, bei dem keine klare Ursache vorliegt. In den übrigen Fällen liegen eine oder mehrere verschiedene Pathologien vor, die mitunter einer operativen Therapie bedürfen.

Degenerative und erworbene Veränderungen

Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule umfassen ein weites Spektrum und betreffen sowohl die knöchernen Strukturen und Gelenke als auch die Bandscheiben. Zu den ersten Veränderungen gehören eine Höhenminderung des Intervertebralraums sowie eine zunehmende Sklerosierung der Grund- und Deckplatten, welche im Verlauf zudem zu der Ausbildung von Spondylophyten, Arthrose der Facettengelenke oder einer degenerativen Spondylolisthese führen können[29,30].

Die durch solche degenerativen, morphologischen Veränderungen verursachte Spinalkanalstenose ist dabei der häufigste Grund für einen operativen Eingriff beim älteren Menschen. Sie geht typischerweise mit Lumbalgien und pseudoradikulären Parästhesien einher, welche vor allem bei Belastung auftreten. Diagnostisch ist die MRT zum Standard geworden[31].

Degenerative Veränderungen einer Bandscheibe können im Verlauf zu Protrusionen bis hin zum vollständig sequestrierten Bandscheibenvorfall führen. Hierbei haben jüngere Patienten aufgrund des höheren Flüssigkeitsanteils des Nucleus pulposus ein höheres

Risiko einer solchen Herniation. Durch die Affektion einer oder mehrerer Nervenwurzeln kommt es typischerweise zu radikulären Schmerzen sowie sensomotorischen Defiziten. Auch hier steht die MRT-Diagnostik im Vordergrund. Neben verschiedensten konservativen und interventionellen Therapieoptionen gibt es unterschiedliche operative Ansätze. Letztere sind insbesondere bei progredienten neurologischen Defiziten, wie etwa einem Cauda-Equina-Syndrom (s.u.) indiziert[32,33].
Der o.g. degenerativen Spondylolisthese steht die Spondylolisthesis vera gegenüber, welche auf eine Spondylolyse zurückzuführen ist. Einen knöchernen Defekt im interartikularen Bereichs des Wirbelbogens, welcher vor allem bei Jugendlichen festgestellt wird[34].

Neben den angeborenen und degenerativen Veränderungen gibt es einige Krankheitsbilder, welche teils mit akuten Beschwerden einhergehen und einer zeitnahen, adäquaten Diagnostik und Therapie bedürfen. Hierzu zählen vor allem Malignome, Frakturen, Infektionen und eine akute neurologische Schädigung etwa im Rahmen eines Cauda-Equina-Syndroms[35].

Malignome

Malignome im Bereich der Wirbelsäule sind vor allem ossäre Metastasen, welche von Primarien wie Mamma-, Prostata-, Bronchial- oder Nierenzellkarzinomen hämatogen in die Wirbelsäule metastasieren. Daneben sind das multiple Myelom sowie primäre Tumoren der Wirbelsäule, welche jedoch einen kleinen Anteil einnehmen, zu nennen. Klinisch imponieren häufig Schmerzen, welche beispielweise auf eine pathologische Fraktur oder eine intraossäre Druckerhöhung zurückzuführen sind. Die Diagnostik besteht neben der körperlichen Untersuchung aus Röntgen- und CT-Bildgebung[36,37]. Zur genauen Beurteilung der Tumorausdehnung ist eine Kontrastmittel-MRT indiziert[38]. Die Therapie ist abhängig von den sogenannten NOMS-Kriterien, welche den neurologischen Status, die onkologische Beurteilung, die biomechanische Stabilität und den Allgemeinzustand des Patienten umfassen[39]. Neben konservativen Optionen wie der Radiatio oder medikamentösen Therapie kommen je nach Therapieziel verschiedene operative Verfahren in Frage. Hierzu gehören eine vollständige Tumorresektion, eine Dekompression, eine Stabilisierung oder eine Augmentation[37].

Frakturen und traumatische Verletzungen

Neben pathologischen Frakturen durch Neoplasien sind osteoporosebedingte Frakturen von Wirbelkörpern eine häufige Ursache für Rückenschmerzen, insbesondere bei älteren Frauen. Die Prävalenz für eine osteoporotische Wirbelkörperfraktur liegt für europäische Frauen zwischen 18 und 26 Prozent[40]. Sie gehen zu 85 Prozent mit Rückschmerzen einher, selten mit einer neurologischen Symptomatik. Die radiologische Diagnostik besteht vor allem aus konventionellen Röntgenaufnahmen, in denen Veränderungen der Wirbelkörper detektiert werden können und MRT-Aufnahmen, zur Berücksichtigung von Differentialdiagnosen sowie des Alters der Fraktur. Eine Computertomografie ist vor allem zur Planung von operativen Maßnahmen sinnvoll. Die richtige Wahl aus verschiedenen operativen und konservativen Therapieoptionen ist u.a. abhängig von Klinik, Alter der Fraktur, Deformität des Wirbels sowie dem eventuellen Vorliegen neurologischer Symptome[41].

Traumatische Frakturen und instabile Verletzungen der Wirbelsäule, insbesondere der thorakalen und lumbalen Abschnitte, sind häufig Folge von Hochrasanztraumata wie etwa Verkehrsunfällen oder Stürzen aus großer Höhe. Sie können mit schwerwiegenden Folgen wie einer Paraparese einhergehen. Neben der klinischen Untersuchung, zu der eine neurologische Untersuchung gehört, steht die radiologische Diagnostik mittels konventionellem Röntgen und Computertomografie im Vordergrund[42]. In Abhängigkeit der Art der Verletzung sowie einer möglichen neurologischen Symptomatik kommen auch hier konservative und operative Therapieansätze in Frage. So können stabile Frakturen ohne neurologische Defizite konservativ, etwa mit Orthesen versorgt werden[43].

Infektiöse Prozesse

Infektiöse Prozesse der Wirbelsäule können als Entzündung der Bandscheibe (Spondylodiszitis) oder Wirbelkörper (Spondylitis) vorliegen, wobei meist beide Strukturen betroffen sind. Die Inzidenz liegt zwischen 1:100.000 bis 1:250.000, die Mortalität wird auf 2 bis 4 Prozent geschätzt[44,45]. Der häufigste zugrundeliegende Erreger ist ein Staphylokokkus areus[46]. Die häufigsten Symptome sind Rückenschmerzen (86%) und Fieber (60%). Neurologische Defizite treten bei ca. einem Drittel der Betroffenen auf[47].

Zur Diagnostik stehen neben der klinischen Evaluation laborchemische Untersuchungen (Entzündungsparameter, Blutkulturen) sowie bildgebende Verfahren im Vordergrund. Die Therapie besteht aus einer antiinfektiven Behandlung mittels Antibiotika sowie einer eventuell notwendigen operativen Therapie zur Stabilisierung des betroffenen

Segments, Entlastung eines epiduralen Abszesses oder Freilegung von Nerven oder Rückenmark bei Vorliegen von neurologischen Defiziten. Einen hohen Stellenwert im Rahmen der operativen Therapie hat dabei das radikale Debridement[48-51].

Cauda-equina-Syndrom

Das Cauda-equina-Syndrom ist ein eher seltenes Krankheitsbild, welches durch eine große Raumforderung im Bereich des lumbosakralen Spinalkanals, beispielsweise einen Bandscheibenvorfall, verursacht wird, und stellt einen Notfall dar. Während die Symptome initial eher mild verlaufen können, kann es im Verlauf zu Taubheit und Paresen der unteren Extremität, einer Reithosenanästhesie und Störungen der Blasen- und Mastdarmfunktion kommen. Goldstandard in der Diagnostik ist eine MRT. Die operative Dekompression steht therapeutisch im Vordergrund, zudem wird mitunter auch eine hochdosierte intravenöse Therapie mit Kortikosteroiden empfohlen[52,53].

2.4 Operative Eingriffe am lumbosakralen Übergang

Im folgenden Kapitel werden die Operationstechniken derjenigen Eingriffe am lumbosakralen Übergang näher beschrieben, welche im Rahmen der Arbeit untersucht wurden. Dazu gehören die dorsalen Techniken der posterioren lumbalen interkorporalen Fusion (PLIF) und der transforaminalen lumbalen interkorporalen Fusion (TLIF). Als einzige ventrolaterale Technik wird zudem auf die anteriore lumbale interkorporale Fusion (ALIF) eingegangen.
Begleitend zu den dorsalen Techniken und teilweise auch zur ALIF erfolgt in der Regel eine dorsale Instrumentation.

2.4.1 Dorsale Instrumentierung

Die heute angewandte dorsale Instrumentierung basiert auf der im Jahr 1986 von Roy-Camille beschriebenen transpedikulären Schraubenimplantation und wurde im Verlauf unter anderem durch Magerl und Dick weiterentwickelt und um die vertikal eingebrachten Stäbe ergänzt[54,55]. Der Zugang ist zur Wirbelsäule ist dem des PLIF identisch (s.u.). Sodann wird die Kortikalis des Pedikels mittels Pfriem, Ahle oder Bohrer eröffnet. Der Eintrittspunkt der Pedikelschraube liegt am Übergang zwischen der Pars articularis des Wirbelbogens und dem Processus transversus. Nachdem sichergestellt wurde, dass der Pedikel nicht perforiert ist, wird die Pedikelschraube eingebracht. Sowohl das Eröffnen des Pedikels, als auch die Schraubenimplantation werden durch regelmäßige Röntgenbilder kontrolliert. Sodann werden die vertikalen Stäbe in entsprechender Länge

mit den Pedikelschrauben verbunden und gegebenenfalls ein Querverbinder eingebracht[56,57].

2.4.2 Posteriore lumbale interkorporale Fusion (PLIF)

Die posteriore lumbale interkorporale Fusion wurde erstmals von Briggs und Milgan im Jahr 1944 beschrieben und in den folgenden Jahren durch Jaslow und Cloward weiterentwickelt[58-60].

Der Eingriff erfolgt in Bauchlage über den posteromedianen Zugang. Hierbei verläuft der Hautschnitt über den Processus spinosi der entsprechenden Höhe. Nach dem Durchtrennen des sukcutanen Fettgewebes sowie der Faszie wird die autochthone Rückenmuskulatur subperiostal nach lateral abgeschoben und das interlaminäre Fenster dargestellt. Es erfolgt eine bilaterale Laminotomie und indikationsabhängig ggf. die weitere Resektion des Wirbelbogens im Sinne einer Hemilaminektomie oder Laminektomie. Nach Entfernung des Lig. flavum und Darstellung der Dura wird diese nach medial mobilisiert, das hintere Längsband inzidiert und das Bandscheibenfach eröffnet. Dieses wird ausgeräumt und die Deck- und Grundplatten angefrischt. Auch dieser Schritt erfolgt von beiden Seiten. Im Anschluss werden zwei Cages - je einer von rechts und links - mit autologen oder homologen Knochen oder Knochenersatzmaterial in das Bandscheibenfach eingesetzt und das Fach weiterhin mit o.g. Knochenmaterial aufgefüllt. Nach Röntgenkontrolle und vollständiger dorsaler Instrumentation erfolgt die Einlage einer Drainage und der schichtweise Wundverschluss[61,62].
Das PLIF-Verfahren findet beispielsweise Anwendung, wenn eine beidseitige Dekompression erfolgen soll, oder der Korridor zum Bandscheibenfach eher klein ist[63].

2.4.3 Transforaminale lumbale interkorporale Fusion (TLIF)

Die transforaminale lumbale interkorporale Fusion wurde im Jahr 1982 erstmals von Harms und Rollinger beschrieben[64].
Lagerung und Zugang der TLIF sind denen der PLIF identisch. Nach dem Abschieben der autochthonen Muskulatur erfolgt eine einseitige Facettengelenksentfernung, wodurch das Neuroforamen entdacht wird. Einer indikationsabhängige Dekompression folgt die transforaminale Inzision des hinteren Längsbandes und Ausräumen des Bandscheibenfaches wie bei der PLIF beschrieben, jedoch unilateral. Im Anschluss erfolgt wiederum die Implantation eines Cages sowie von Knochen bzw. Knochenersatzmaterial in das Bandscheibenfach[61].

Die Vorteile der TLIF im Vergleich zur PLIF liegen in ihrer geringeren Invasivität und der damit einhergehend kürzeren Operationszeit, geringeren Blutverlust und geringeren Rate intraoperativer Nervenverletzungen[65].

2.4.4 Anteriore lumbale interkorporale Fusion (ALIF)

Die erstmalige Beschreibung der anterioren lumbalen interkorporalen Fusion geschah im Jahr 1932 durch Capener[66].
Der Eingriff erfolgt in Rückenlage. Es folgt ein mittiger oder anterolateraler Hautschnitt mit anschließender Inzision der Faszie und Präparation durch die Muskulatur bis in den Retroperitonealraum. Meist erfolgt der Zugang über links. Nach Darstellung der Aorta bzw. der Iliakalgefäße, welche mobilisiert werden, erfolgt das Ligieren von ventral der Wirbelsäule verlaufenden Gefäße und sodann die Inzision des vorderen Längsbandes. Auch bei der ALIF wird das Bandscheibenfach ausgeräumt und Deck- sowie Grundplatte angefrischt. Sodann wird analog zu PLIF und TLIF ein Cage und Knochenmaterial implantiert. Im Unterschied zu den beiden genannten Verfahren ist eine dorsale Instrumentation jedoch nicht unbedingt erforderlich[63].
Ein weiterer Vorteil ist das Einbringen eines größeren Implantats, was die Rekonstruktion der Lordose erleichtert. Die Nachteile gehen sind auf den anspruchsvollen Zugang und die damit einhergehenden intraoperativen Komplikationen zurückzuführen[62].

2.5 Komplikationen nach operativen Eingriffen am lumbosakralen Übergang

2.5.1 Pseudarthrose

Eine häufige Komplikation nach Fusionen im Bereich der Lendenwirbelsäule sowie des lumbosakralen Übergangs ist das Auftreten einer Pseudarthrose. Diese ist meist definiert als ausbleibende knöcherne Fusion zwischen den adressierten Wirbelkörpern nach einem Jahr postoperativ[8]. Während die Rate der Pseudarthrosen in den letzten Jahrzehnten immer weiter abnimmt, werden immer noch Häufigkeiten von 5 bis 33 Prozent beschrieben[6].
Dabei ist es schwer vorherzusagen, ob eine Pseudarthrose zu relevanten, subjektiven Beschwerden und somit zu einem Handlungsbedarf führt[67]. Studien aus der längeren Vergangenheit konnten bezüglich der Rückkehr zur körperlichen Aktivität, Symptomlinderung und Gesamtzufriedenheit keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Vorliegen einer Pseudarthrose nachweisen[68]. Neuere Arbeiten

hingegen zeigten jedoch ein besseres klinisches Langzeit-Outcome bei Patienten mit erfolgreicher knöcherner Fusion. So gaben solche Patienten zu 86 Prozent ein „gutes“ oder „exzellentes“ Ergebnis an, während die Rate bei Patienten mit Pseudarthrose bei lediglich 56 Prozent lag[69].
Weshalb Pseudarthrosen teils asymptomatisch bleiben und zu guten klinischen Ergebnissen führen, auf der anderen Seite aber mit Beschwerden und folglich weiterem Therapiebedarf einhergehen können, ist ungeklärt[70,71].

Es wurden eine Vielzahl von Einflüssen untersucht, welche das Auftreten einer Pseudarthrose begünstigen. Diese umfassen sowohl vorbestehende Faktoren, wie beispielsweise Vorerkrankungen, die Einnahme verschiedener Medikamente, eine positive Raucheranamnese, als auch biomechanische Aspekte, Infektionen sowie durch den Operateur beeinflussbare Faktoren[8,9].
Ein wesentlicher Risikofaktor ist das Rauchen, welcher zu einer erhöhten Rate von Pseudarthrosen und auch zu einer erhöhten Häufigkeit von daraus einhergehenden Operationen führt[72]. Während Raucher in einem Zeitraum von ca. 5 Jahren postoperativ aufgrund einer Pseudarthrose, Implantatversagen oder ASD zu 32 Prozent nochmals operiert werden, liegt die Rate bei Nicht-Rauchern bei 13,4 Prozent[73].
Eine verminderte Fusionsrate wird zudem bei Einnahme von nicht-steroidalen Antirheumatika (NSAID, englisch: non-steroidal anti-inflammatory drugs) sowie Glukokortikoiden, wie zum Beispiel Dexamethason, beschrieben[74-76].

In einer Arbeit von 2015 verglichen Han et al. die Fusionsraten von monosegmentalen PLIF auf Höhe L4/5 mit derer gleicher Eingriffe im Segment L5/S1. Es zeigte sich eine deutlich geringer Fusionsrate am lumbosakralen Übergang (42,9% vs. 89,8%), welche die Autoren auf die anatomischen und biomechanischen Unterschiede zurückführen und somit die Sonderstellung des lumbosakralen Übergangs hervorheben. So ist der Bewegungsumfang in diesem Segment größer, die Kompression zwischen den Wirbelkörpern kleiner und die Bandscheibe keilförmiger, wodurch bei posteriorem Zugang weniger Kontaktfläche zwischen Implantat und Knochen erreicht wird. Pathologische spinopelvine Parameter waren in der Gruppe der Pseudarthrosen zwar häufiger gemessen worden, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Einen Einfluss dieser, sowie der sagittalen Balance auf das Auftreten einer Pseudarthrose konnten die Autoren somit nicht nachweisen[77].
Daneben sind auch den technische, den Eingriff selbst betreffende Faktoren von Bedeutung. So ist die Pseudarthrosen-Rate bei Eingriffen höher, welche zwei oder mehr Segmente betreffen[74,78]. Gemäß einer Arbeit von Deguchi et al. liegt die Fusionsrate bei

monosegmentalen Eingriffen bei 82 Prozent, bei bisegmentalen Eingriffen hingegen bei 74 Prozent. Buttermann untersuchte 1997 zudem den Einfluss des in das Bandscheibenfach eingebrachten Materials bei aufgrund einer symptomatischen Pseudarthrose erneut operierten Patienten. In den radiologischen Verlaufskontrollen zeigte sich bei verwendeten Autografts zu 100 Prozent eine erfolgreiche Fusion während die Pseudarthrosenrate nach Verwendung von Allografts bei 6 Prozent lag. Jedoch war das klinische Ergebnis bei Patienten mit Allograft insgesamt zufriedenstellender[79].

2.5.2 Adjacent segment disease (ASD)

Eine weitere relevante Komplikation nach operativen Eingriffen an der der Wirbelsäule ist die Anschlusssegmentdegeneration. Hierbei handelt es sich neben Instabilitäten auch um Listhesen, Bandscheibenvorfälle, Facettengelenkshypertrophien oder Kompressionsfrakturen im Bereich der einer Fusion angrenzenden Segmente[80]. Eine einheitliche Definition gibt es hier nicht, jedoch ist eine Beschreibung von Glattes et al. mit einer Zunahme des sagittalen Cobb-Winkels von mindestens 10 Grad im Vergleich zu präoperativen Messungen weit verbreitet[81]. Da nicht alle o.g. Degenerationen zu klinisch relevanten Beschwerden führen, ist es sinnvoll eine Anschlusssegmentdegeneration von der im Englischen vorteilhafter beschriebenen symptomatischen „adjacent segment disease“ (ASD) zu unterscheiden, auf die im Folgenden weiter eingegangen wird[82]. Das Aufkommen einer ASD nach Eingriffen an der Lendenwirbelsäule wird von Sears et al. mit einer jährlichen Inzidenz von 2,5 Prozent und einer 10-Jahres-Prävalenz von über 22 Prozent beschrieben[83].

Es wird angenommen, dass der biomechanische Anspruch an die Anschlusssegmente vergrößert wird, da zum einen die Anzahl der beweglichen Segmente reduziert wird und zum anderen durch die fusionierten Segmente eine größere Kraft auf diese ausgeübt wird, vergleichbar mit einem längeren Hebelarm[84].

In der Literatur werden viele Faktoren beschrieben, welche einen möglichen Einfluss auf das Auftreten einer ASD haben. Dabei zeigen sich in verschiedenen Arbeiten häufig widersprüchliche Ergebnisse, wie ein Review von Radcliff et al. veranschaulicht[10]:

So werden Rauchen oder ein höheres Alter in einigen Studien als Risikofaktoren genannt[83,85], während der Einfluss dieser Faktoren in anderen Arbeiten nicht dargelegt werden konnte[86,87]. Auch hinsichtlich der Beziehung von bereits präoperativ bestehenden, degenerativen Veränderungen der Anschlusssegmente auf das Auftreten einer ASD im postoperativen Verlauf ist widersprüchliche Literatur zu finden[88-91].

Einen negativen Einfluss im Sinne eines vermehrten Auftretens von ASD scheinen jedoch verschiedene biomechanische Aspekte zu haben. Hier werden neben einer

Hypolordose der fusionierten Segmente, einem pathologischem sagittalem Profil auch eine hohe Pelvic incidence beschrieben[86,92-94].

Ferner geht Radcliff auch auf Faktoren ein, die in direktem Zusammenhang zum durchgeführten Eingriff stehen. So beschreiben Cadoso et al., dass Dekompressionen im Sinne einer vollständigen Laminektomie am kranialen Ende der Fusion zu einer Destabilisierung des Anschlusssegmentes führen[95]. Daneben scheint auch die Länge einer Fusion eine Rolle zu spielen, wobei längere Fusionen mit dem vermehrten Auftreten einer ASD assoziiert sind[83]. Min et al. verglichen anteriore (ALIF) mit posterioren (PLIF) Zugängen. Hierbei wurden Anschlussdegenerationen bei 44 Prozent der Patienten in der ALIF-Gruppe nachgewiesen, in der PLIF-Gruppe hingegen bei 82,6 Prozent[96].

2.5.3 Schraubenlockerung

Neben der ASD und der Pseudarthrose stellt die Schraubenlockerung eine weitere Komplikation dar. Die Häufigkeit ihres Auftretens wird in der Literatur sehr heterogen beschrieben. Während McAfee et al. in einer retrospektiven Arbeit von 1991 unter 526 Schrauben keine Lockerung feststellen konnten[97], beschreiben Röllinghoff et al. eine Schraubenlockerung bei 35 der von ihnen 64 untersuchten Patienten (54%), welche eine multisegmentale Fusion im Bereich der Lendenwirbelsäule erhielten[7]. Dabei lagen jedoch lediglich bei 20% dieser Patienten relevante Beschwerden vor. Diese eingeschränkte klinische Relevanz bestätigt auch eine Arbeit von Bredow et al.: Bei 45 von 365 (12,3%) Patienten wurde im CT eine Schraubenlockerung erkannt, eine Revision war jedoch nur bei 23 Patienten (6,3%) notwendig[98].

Auch die Ergebnisse hinsichtlich der Risikofaktoren für das Auftreten einer Schraubenlockerung sind teils widersprüchlich. So konnten Ohba et al. keine signifikanten Unterschiede bezüglich Alter, Geschlecht, Länge der Instrumentierung und Rauchverhalten bei Patienten mit und ohne Auftreten einer Schraubenlockerung feststellen[99]. Hingegen beschreiben Wu et al. höhere Lockerungsraten bei älteren Patienten und solchen mit Diabetes mellitus[100].

Einer der größten Risikofaktoren ist das Vorliegen einer Osteoporose oder Osteopenie oder eine verminderte Knochendichte, gemessen etwa an den Hounsfield-Einheiten der Wirbelkörper[11,12,98,101]. Nicht nur eine verminderte Knochenqualität, sondern auch ein eingeschränkter Zustand der der Wirbelsäule anliegenden Muskulatur – dem dorsalen verlaufenden Musculus errector spinae sowie dem ventrolateral gelegenen Musculus psoas – ist mit einer erhöhten Rate von Schraubenlockerung assoziiert[102,103].

Auch biomechanische Aspekte spielen eine Rolle, insbesondere die spinopelvinen Parameter sind hier zu nennen. Eine hohe Pelvic incidence, eine große Differenz zwischen Pelvic incidende und lumbaler Lordose und eine sagittale Imbalance werden mit Lockerungen in Verbindung gebracht[11,101,103].

Ähnlich wie bei der Pseudarthrose und der ASD werden Risikofaktoren beschrieben, welche direkt mit der Operation, etwa dem Ausmaß des Eingriffs, dem verwendeten Material oder der Operationstechnik, zusammenhängen.

Während Ohba et al. wie oben beschrieben keine Einfluss der Länge der Instrumentierung feststellen konnten[99], kommen andere Arbeitsgruppen zu dem Ergebnis, dass eine höhere Anzahl von adressierten Segmenten zu einer höheren Lockerungsrate führt[12,102]. Die Sonderstellung des lumbosakralen Übergangs wird in der Arbeit von Yuan et al. aus dem Jahr 2021 deutlich. Bei multisegmentalen Eingriffen führte eine Fusion bis auf das Sakrum zu mehr Schraubenlockerungen[101].

Weitere beschriebene Risikofaktoren sind eine unvollständige Reposition einer präoperativ bestehenden Spondylolisthesis, bilaterales Entfernen der Facettengelenke sowie das Durchführen einer Laminektomie ohne ventrale Stabilisierung. Protektiv hingegen ist das Verwenden eines größeren Cages[12]. Auch die Lage der implantierten Schrauben ist von Bedeutung. Eine kleinere Konvergenz sowie eine kürzere intraossäre Schraubenlage der in den SWK-1 implantierten Schraube führte gemäß einer Arbeit von Kim et al. ebenfalls zu einer höheren Lockerungsrate[103].

2.6 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war es, Variablen zu ermitteln, welche als mögliche Risikofaktoren für langfristige Komplikationen nach fusionierenden Eingriffen am lumbosakralen Übergang (Pseudarthrose im Segment L5/S1, Schraubenlockerung, ASD) in Frage kommen. Dabei sollten möglichst viele Faktoren eingeschlossen und primär im Rahmen einer deskriptiven Statistik analysiert werden.

3 Material und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

Um die o.g. Fragestellung zu beantworten wurden die Daten von 100 Patienten untersucht, welche sich zwischen Januar 2008 und Mai 2017 einem operativen Eingriff mit Stabilisierung im Bereich des lumbosakralen Übergangs an der Universitätsklinik Köln unterzogen.

Die erste Einsicht in die Akten potentiell in Studie aufgenommener Patienten erfolgte zufällig anhand der Operationspläne aus den oben genannten Jahren. Insbesondere wurden sodann Patienten ausgewählt, die im Verlauf ihrer Krankheitsgeschichte eine Langzeitkomplikation in Form einer Pseudarthrose, Schraubenlockerung und/oder ASD aufwiesen. Die Häufigkeiten des Auftretens von Komplikationen sind dementsprechend nicht repräsentativ.

Vorausgesetzt war ein aktenanamnestisches Follow-up von mindestens einem Jahr nach Durchführung des im Rahmen der Datenerhebung berücksichtigen Eingriffes.

3.2 Datenerhebung

Zur Erhebung der Daten wurden verschiedene Dokumente aus der elektronischen Patientenakte verwendet, die im Krankenhaus-Informationssystem ORBIS (Fa. Agfa HealthCare GmbH, Bonn) gespeichert sind, welches von der Uniklinik Köln genutzt wird. Dazu gehörten neben Operationsberichten und -protokollen auch Anästhesieprotokolle, radiologische Befundberichte sowie Entlassungsbriefe.

Zudem erfolgten Beurteilungen und Messungen anhand vorliegender Datensätze aus bildgebenden Verfahren. Neben konventionellen Röntgenaufnahmen wurden auch CT- und MRT-Aufnahmen ausgewertet. Messungen von Winkeln, Streckenlängen und Hounsfield-Einheiten, Einzeichnen von Hilfslinien sowie die 3D-Rekonstruktion von Schnittbildern erfolgten mit dem Programm Impax EE (Fa. Agfa HealthCare GmbH, Bonn).

Zur Datenerhebung wurden klinikeigene Computer mit der Benutzeroberfläche Windows (Fa. Microsoft Corporation, Redmond WA (USA)) genutzt. Die Daten wurden im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel des gleichen Anbieters erfasst und gespeichert.

In vielen Fällen konnten aufgrund des Fehlens von Dokumenten oder Bilddatensätze nicht alle Parameter zu einem Patienten erhoben werden.

Die Patientendaten wurden anonymisiert erfasst, es handelt sich um eine rein retrospektive Analyse. Es wurden keine neuen Untersuchungen an den Patienten durchgeführt. Eine Kontaktaufnahme zu den Patienten fand ebenfalls nicht statt.

3.2.1 Erhebung patientenspezifischer Daten

Anhand von Anästhesieprotokollen und Entlassungsbriefen wurden neben dem Alter zum Zeitpunkt der Operation, Geschlecht, Größe, Gewicht und der daraus berechnete Body-Mass-Index (BMI; Gewicht in kg/(Körpergröße in m)^2) erfasst. Zudem wurde evaluiert, ob Faktoren wie eine aktuelle positive Raucheranamnese oder eine vorbekannte und in den oben genannten Unterlagen dokumentierte Osteoporose vorliegen. Die Variable Rauchen wurde dahingehend untersucht, ob zum Zeitpunkt der präoperativen anästhesiologischen Voruntersuchung ein Nikotinabusus bestand, welcher im Anästhesieprotokoll festgehalten wurde. Die Intensität des Konsums und die Anzahl der Packungsjahren oder auch „pack years“ (PY) wurden nicht berücksichtigt. Auch die Einnahme von Medikamenten in Form von Bisphosphonaten oder oralen Glukokortikoiden wurde erfasst. Dauer der Einnahme und Dosierung wurden nicht erhoben.

Der präoperative gesamtgesundheitliche Zustand des Patienten, welcher seitens der Kollegen der Anästhesiologie in Form der ASA-Klassifikation beurteilt wird, wurde ebenfalls in die Untersuchung aufgenommen. Diese Klassifikation der American Society of Anesthesiologists (ASA) wurde 1941 erstmals beschrieben und seitdem mehrmals überarbeitet. [104-106]. In der aktuellen Version werden die Klassen I-VI unterschieden. Klasse I beschreibt einen gesunden Patienten. ASA II und III entsprechen Patienten mit leichten (II) bzw. schweren (III) systemischen Erkrankungen, während diese bei ASA IV zusätzliche eine anhaltende Bedrohung des Lebens darstellen. Patienten, die der Klasse V zugeordnet werden, würden ihren aktuellen Zustand ohne eine Intervention mutmaßlich nicht überleben. ASA VI klassifiziert einen hirntoten Patienten [107].

Daneben wurde berücksichtigt, ob eine chronische Vorerkrankung bestand. Hierbei wurden insbesondere kardiovaskuläre Vorerkrankungen berücksichtigt (mit Ausnahme eines isolierten arteriellen Hypertonus).

3.2.2 Erhebung operationsbezogener Daten

Anhand der Operationsberichte und -protokolle wurden das operative Verfahren sowie die Indikation für den jeweiligen Eingriff festgestellt. Unterschieden wurden hinsichtlich des Verfahren zwischen TLIF, PLIF, ALIF, einer zweizeitigen Kombination von PLIF und ALIF sowie einer dorsalen Instrumentierung, in deren Rahmen kein Material in Form

eines Cages oder eines Beckenkammspans in die Bandscheibenfächer der betroffenen Segmente eingebracht wurde.
Die Indikationen wurden fünf übergeordneten Gruppen zugeteilt: Unter „angeborenen bzw. degenerativen Veränderungen“ wurden Pathologien wie Spondylolisthesen, Osteochondrosen oder - zum Teil rezidivierende - Bandscheibenvorfälle zusammengefasst. Davon unterschieden wurden Frakturen, Raumforderungen und entzündliche Prozesse, wie beispielsweise Spondylodiszitiden oder intraspinale Empyeme. Indikationen, die keiner der vier oben genannten Gruppen zugeordnet werden konnte, wurden unter „Sonstiges“ zusammengefasst. Dazu gehörten unter anderem Schraubenlockerungen oder eine ASD.

Ebenfalls dem Operationsbericht bzw. -protokoll zu entnehmen war, ob sich der Eingriff auf das Segment L5/S1 beschränkte, oder weitere Wirbelkörper und/oder Bandscheiben adressiert wurden. Auch das Ausmaß einer möglichen Resektion des Wirbelbogens im Sinne einer Dekompression stellte einen der erfassten Parameter dar. Differenziert wurde hier neben dem Ausbleiben einer Resektion zwischen Laminotomie, Laminektomie und Hemilaminektomie.
Zusätzlich wurden anhand diverser Dokumente aus der Patientenakte ermittelt, ob vorangegangene operative Eingriffe des Segments L5/S1 bestanden. Ausschlaggebend war hier, ob im Rahmen einer vorherigen Operation Pedikelschrauben in mindestens einen Pedikel des fünften Lendenwirbels und/oder des ersten Sakralwirbels implantiert wurden. In diesem Fall wurde der untersuchte Eingriff als „Revision“ bezeichnet.

Die Längen der Pedikelschrauben konnten entweder dem Operationsbericht entnommen werden, oder in postoperativ angefertigten CT-Bildern ausgemessen werden. Hinsichtlich ihrer Länge wurden die vier Schrauben zunächst einzeln betrachtet. Anschließend wurde für die Schraubenpaare in LWK 5 und SWK 1 jeweils der Mittelwert berechnet.
Neben den Maßen der Schrauben wurde mithilfe von postoperativ angefertigten CT-Aufnahmen außerdem deren Lage im Wirbelkörper evaluiert. Für die im LWK5 einliegenden Schrauben wurde die „relative Länge“ ermittelt. In der 3D-Rekonstruktion

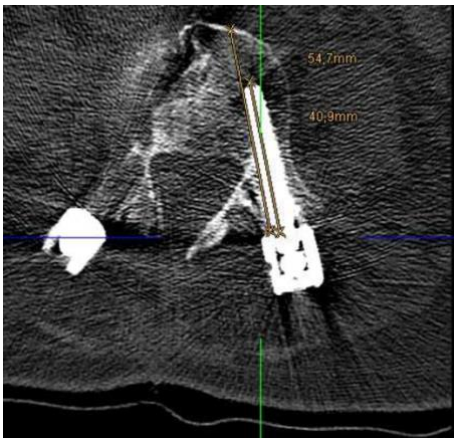


Abbildung 2: Messung der „relativen Länge“

Quelle: Bildschirmaufnahme aus Impax EE, erstellt vom Autor

des CT-Datensatzes wurden die betrachteten Schichten so eingestellt, dass die zu beurteilende Schaube in ihrer gesamten Länge und mit maximalem Durchmesser abgebildet war. In diesem Bild wurde dann entlang der medialen Schraubenseite eine Gerade gezogen und die Streckenlänge von der Eintrittsstelle der Schraube in den Pedikel bis zur Vorderkante des Wirbelkörpers gemessen (vgl. Abbildung 2). Der Quotient aus der Schraubenlänge (Dividend) und der so ermittelten Länge (Divisor) stellt die „relative Länge“ dar und wird als prozentualer Anteil angegeben. Aus den so ermittelten Werten für die jeweils linke und rechte Schraube wurde der Mittelwert gebildet.
Analog wurden die in den SWK 1 implantierten Schrauben in der oben genannten Weise dargestellt. Hinsichtlich der Lage wurde hier beurteilt, ob das ventrale Ende der Schrauben bis in die ventrale Kortikalis des Sakrums eingebracht wurde. Im Rahmen der Auswertung wurde hier festgehalten, ob mindestens eine der beiden Schrauben bikortikal platziert wurde. In diesem Fall wird die Schraubenlage als „bikortikal“ beschrieben.
Dem Operationsbericht respektive -protokoll wurde zudem entnommen, ob ein Querverbinder als Verbindung zwischen den beiden vertikal eingebrachten Stäben implantiert wurde.

Neben den für die Instrumentierung verwendeten Implantaten wurden noch weitere Materialien berücksichtigt, welche im Rahmen des Eingriffes im Bereich der Wirbelsäule eingebracht wurden. Die Informationen hierzu wurden den Operationsberichten und -protokollen entnommen.
Im Falle einer interkorporalen Fusion wurde das in das Bandscheibenfach eingebrachte Material als Parameter in die Datenerhebung aufgenommen. Hierbei wurde zwischen einem autologen Beckenkamm-Span und einem künstlichen Cage differenziert.

3.2.3 Erhebung anatomischer Daten

Durch diverse Messungen in den vorliegenden radiologischen Aufnahmen wurden anatomische Merkmale der Patienten sowie vorbestehende degenerative Veränderungen ermittelt. Hierzu wurden, wenn möglich, vor allem präoperativ angefertigte Aufnahmen genutzt. In einzelnen Fällen erfolgten die Messungen aber auch in Aufnahmen, welche nach dem Eingriff erstellt wurden.

Zunächst wurden konventionelle Röntgenbilder betrachtet. Genutzt wurden Aufnahmen der Lendenwirbelsäule in zwei Ebenen (seitlicher und anterior-posteriorer (a.p.)

Strahlengang), des seitlich aufgenommen thorakolumbalen Übergangs sowie seitliche Wirbelsäulenganzaufnahmen. Voraussetzung war, dass diese Aufnahmen im Stehen angefertigt wurden und es sich nicht um sogenannte Funktionsaufnahmen handelte, bei denen der Patient eine Flexion oder Extension im Bereich der Wirbelsäule durchführte.

Zur Messung der lumbalen Lordose wurde der Winkel zwischen der Deckplatte des 1. Lendenwirbelkörpers und der Grundplatte von LWK 5 gemessen. Analog dazu wurde die thorakale Kyphose durch den Winkel zwischen der Deckplatte von BWK 5 und der Grundplatte von BWK 12 bestimmt. Die Kyphose des thorakolumbalen Übergangs wurde als Winkel zwischen Deckplatte BWK 10 und Grundplatte von LWK 2 gemessen. Die Messungen dieser Winkel erfolgten jeweils an Aufnahmen der Wirbelsäule mit seitlichem Strahlengang und nach Möglichkeit an präoperativ angefertigten Aufnahmen.

Die in Kapitel 2.2 beschriebenen spinopelvinen Parameter „Sacral slope“, „Pelvic tilt“ und „Pelvic incidence“ wurden in seitlichen Aufnahmen der Lendenwirbelsäule bestimmt. Hierzu wurde zunächst ein Kreis um die Kortikalis des Femurkopfes gezogen und das Zentrum des Kopfes markiert. War die Aufnahme so angefertigt, dass sich die beiden Femurköpfe nicht genau aufeinander projizierten, wurde der Femurkopf genutzt, welcher dem Röntgendetektor näher lag und somit auf dem Bild größer erschien. In einigen Fällen war zudem nicht die gesamte Zirkumferenz des Femurkopfes abgebildet. Hier war es meist trotzdem möglich das Zentrum zu ermitteln, in dem wie oben beschrieben, ein Kreis über die Kortikalis gelegt wurde. Dieser wurde in seinem Durchmesser so angepasst, dass seine Grenze mit den zum Teil abgebildeten Konturen des Femurkopfes übereinstimmten. Als Annäherung zum Zentrum des Kopfes wurde dann das Zentrum des Kreises genutzt.

Sodann wurde eine Strecke eingezeichnet, welche der Deckplatte des SWK 1 in ihrer Gesamten Länge auflag (im Folgenden „Strecke 1“). Vom Mittelpunkt dieser Strecke wurde im rechten Winkel eine zweite Linie nach dorsokaudal gezogen (im Folgenden „Strecke 2“). Ausgehend von dem Mittelpunkt wurde außerdem eine Linie zum Zentrum des Femurkopfes respektive des eingezeichneten Kreises gezogen, welche nachfolgend als „Strecke 3“ bezeichnet wird. Zudem wurden vom Kopf- bzw. Kreis-Zentrum eine vertikale nach kranial verlaufende Linie (im Folgenden „Vertikale“), sowie eine vom

dorsalen Ende der Deckplatte von SWK1 horizontal nach ventral verlaufende Linie (im Folgenden „Horizontale“) erstellt.

Anhand der so erstellten Hilfslinien konnten die oben genannten Parameter berechnet werden. „Sacral slope“ ist der Winkel zwischen Strecke 1 und der Horizontalen, „Pelvic tilt“ der Winkel zwischen Strecke 3 und Vertikaler, während der Winkel zwischen den Strecken 2 und 3 den Parameter „Pelvic incidence“ darstellt.

Als weiterer Wert wurde anhand dieser Markierungen der Overhang (engl. für Überhang) bestimmt. Dazu wurde die kürzeste Entfernung vom Mittelpunkt der Strecke 1 zur Vertikalen gemessen [108].

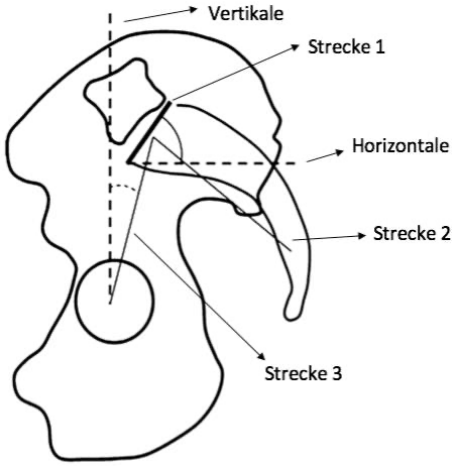


Abbildung 3: Messung der spinopelvinen Parameter

Quelle: Roussouly et al. 2011, modifiziert durch den Autor

Eine schematische Übersicht zu diesen vier Parametern ist der nebenstehende Abbildung zu entnehmen (vgl. Abbildung 3).

Ebenfalls in der seitlichen Aufnahme der Lendenwirbelsäule wurde die Höhe der Bandscheibe zwischen LWK 5 und SWK 1 gemessen. Hierzu wurden zunächst entlang der Grundplatte von LWK 5 und der Deckplatte von SWK 1 Geraden eingezeichnet. Daraufhin wurde der Abstand zwischen den beiden Geraden im mittleren Bereich der Wirbelkörper gemessen. Auch diese Messungen erfolgten nach Möglichkeit in präoperativ angefertigten Röntgenbildern.

Eine weitere Messung erfasste die Höhe von LWK 5 im Verhältnis zum Beckenkamm. Als ausschlaggebende Strukturen wurden dazu die höchste Stelle der Beckenschaufel und die Pedikel des 5. Lendenwirbelkörpers definiert.

Dazu wurde in der a.p.-Aufnahme der LWS zunächst eine Gerade zwischen den am weitesten kranial gelegenen Punkten des linken und rechten Beckenkamms gezogen. Danach wurden die Zentren der Pedikel von LWK 5 markiert, welche sich leicht kaudal der dazugehörigen Deckplatte als ovale Struktur

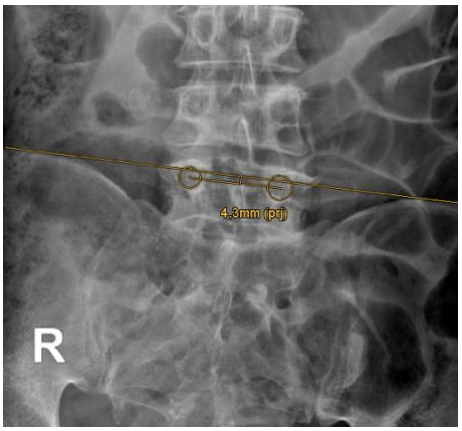


Abbildung 4: Messung der „Höhe L5 zu Beckenkamm“

Quelle: Bildschirmaufnahme aus Impax EE, erstellt vom Autor

projizieren. Zwischen diesen beiden Punkten wurde eine Gerade gezogen. In der Mitte der beiden Pedikel wurde dann der Abstand zwischen den beiden so erstellten Linien gemessen (vgl. Abbildung 4).

In der Zusammenschau von seitlichen und a.p.-Aufnahmen der LWS sowie ggf. auch unter Einsicht von CT-Bilder, wurde beurteilt, ob bereits präoperativ ossäre Verbindungen (Synostosen) zwischen LWK 5 und SWK 1 bestanden. Hierbei wurde hinsichtlich der Genese dieser Verbindungen nicht differenziert.

Die Höhe des LWK 5 im Verhältnis zum Beckenkamm sowie das Vorliegen von Synostosen wurde ebenfalls – sofern möglich – in präoperativ erstellten Röntgen- bzw. CT-Aufnahmen erstellt.

Für die Beurteilung des sagittalen Profils wurde die seitlich angefertigte Wirbelsäulenganzaufnahme betrachtet. Von der Mitte des 7. Halswirbelkörpers aus, wurde ein Lot bis auf die Höhe des Hüftgelenks eingezeichnet und dessen Verlauf in Bezug auf Sakrum und den Femurkopf beurteilt. Schnitt das Lot die Hinterkante des Sakrums oder lag dorsal davon, wurde das sagittale Profil als physiologisch eingestuft. Ein Verlauf zwischen der Hinterkante und dem Zentrum des Femurkopfes wurde als „kompensierte Ventralisierung“ bezeichnet. Die „dekompensierte Ventralsierung“ wurde durch ein Lot definiert, welches ventral des Mittelpunktes des Femurkopfes verlief. Diese Beurteilung wurde nach Möglichkeit an präoperativ angefertigten Röntgenaufnahmen getroffen.

Zudem wurde anhand von CT-Bildern die Dicke des subkutanen paraumbilikalen Fettgewebes gemessen, welche mit dem Gesamtkörperfett korreliert und einen Einfluss auf Komplikationen nach Eingriffen an der Wirbelsäule hat [109,110]. Dazu wurden in axialen Aufnahmen auf Höhe des Bauchnabels die maximale Ausprägung der Dicke des subkutanen Fettgewebes in Millimetern gemessen (vgl. Abbildung 5). Dies erfolgte beidseits des Bauchnabels, woraufhin der Mittelwert aus den beiden Messungen gebildet wurde.



Abbildung 5: Messung des „subkutanen, paraumbilikalen Fettgewebes“

Quelle: Bildschirmaufnahme aus Impax EE, erstellt vom Autor

Aus den vorhandenen Datensätzen der computertomografischen Untersuchungen wurden zudem mithilfe der im Programm Impax EE verfügbaren Werkzeuge die durchschnittlichen Hounsfield-Einheiten (engl. Hounsfield-Units, HU) der Wirbelkörper LWK 5 sowie SWK 1 gemessen. Hierbei handelt es sich um eine Beschreibung der in der Computertomografie entstehenden Graustufen, welche die Dichte des erfassten Gewebes wiederspiegeln. Dabei ist die Dichte von Luft als -1000 HU und die von Wasser als 0 HU definiert [111]. Die Hounsfield-Einheiten eines Wirbelkörpers lassen Rückschlüsse auf die Knochendichte ziehen [112].

Zur Messung wurde erneut eine 3D-Rekonstruktion erstellt, in der die betrachtete Ebene parallel zu den Grund- und Deckplatten der entsprechenden Wirbelkörper verlief. Anschließend wurde ein größtmöglicher Kreis ausgehend von der Mitte des Wirbelkörpers gezogen. Um die hierbei allein die HU der spongiösen Anteile des Wirbelkörpers zu ermitteln, wurde streng darauf geachtet, dass der Kreis keine Teile der Kortikalis einschließt. Durch Impax EE wurde die durchschnittliche HU des innerhalb des Kreises erfassten Gewebes berechnet (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: Messung der „Hounsfield-Einheiten“

Quelle: Bildschirmaufnahme aus Impax EE, erstellt vom Autor

Für den LWK 5 erfolgte diese Messung unmittelbar unterhalb der Deckplatte, auf mittlerer Höhe des Wirbelkörpers sowie unmittelbar oberhalb der Grundplatte. Aus den drei hierbei ermittelten Werten wurde der Mittelwert berechnet. Im SWK 1 wurde eine Messung im mittleren Bereich des Wirbelkörpers durchgeführt.

Ein weiterer Parameter, welcher anhand vorliegender CT-Datensätze erfasst wurde, war das Vorhandensein eines Vakuumphänomens. Hierbei wurde erhoben, ob Gaseinschlüsse im Bandscheibenfach L5/S1, in einem bzw. mehreren kranial davon gelegenen und im CT erfassten Bandscheibenfächern oder sowohl in Fach L5/S1 als auch in Fächern kranial davon vorlag.

Die Messungen und Auswertungen anhand von CT-Aufnahmen wurden – sofern vorliegend – primär in präoperativ angefertigten Datensetzen durchgeführt.

Als weitere Modalität wurden neben Röntgen- und CT-Bildern auch Datensätze aus MRT-Untersuchungen ausgewertet:

Zum einen wurde die Degeneration der Bandscheibe L5/S1 gemäß der Klassifikation nach Pfirrmann erfasst. Hierzu wurden die sagittalen Aufnahmen der Lendenwirbelsäule in T2-Wichtung betrachtet und anhand eines von Pfirrmann et al. beschriebenen Algorithmus in die Grade I bis V eingeteilt. Eine homogen weiße und hyperintense Bandscheibe entspricht Grad I, während eine inhomogene, weiße Struktur mit Auftreten von horizontalen Streifen durch eine Degeneration 2. Grades beschrieben wird. Erscheint die Bandscheibe inhomogen grau und der Anulus fibrosus ist nur noch unscharf vom Nucleus pulposus abgrenzbar, liegt eine drittgradige Degeneration vor. Eine fehlende Differenzierbarkeit und ein dunkelgrauer Aspekt der Bandscheibe entspricht Grad IV, während ein kollabiertes Bandscheibenfach durch Grad V klassifiziert wird [113].

Zum anderen wurde die Degeneration der der Bandscheibe L5/S1 anhand der Klassifikation nach Modic erhoben. Hierzu wurden ebenfalls die sagittalen Schichten der MRT-Aufnahmen der LWS herangezogen und mögliche Veränderungen des Knochenmarks der der Bandscheibe L5/S1 angrenzenden Grundplatte von LWK 5 und Deckplatte von SWK 1 betrachtet. Typ I nach Modic entspricht dabei einer hypointensen Veränderung in der T1-Wichtung (im Bild dunkel) und einer hyperintensen Veränderung in der T2-Wichtung. Stellt sich der Knochen in der T1-Wichtung hyperintens und in der T2-Wichtung iso- oder leicht hyperintens dar, so liegt eine Typ-II-Veränderung vor. Ein Typ III liegt bei einer Hypointensität sowohl in der T1- als auch in der T2-Wichtung vor [114,115].

In den axiale MRT-Bildern wurde zudem der Zustand er autochthonen Rückenmuskulatur in Anlehnung an die von Fuchs et al. angepasste Goutallier-Klassifikation der Rotatorenmanschette erhoben. Hierzu wurde diese auf Höhe des Segments L5/S1 hinsichtlich fettiger sowie narbiger Veränderungen betrachtet. Es wurde zwischen Patienten unterschieden, bei denen die muskulären Anteile die fettigen bzw. narbigen überwogen, solche bei denen ein ausgeglichenes Verhältnis vorlag und zuletzt den Patienten, bei denen die fettigen und narbigen Anteile größer waren als die muskulären Anteile [116,117].

Wie auch bei den CT-Datensätzen erfolgten die hier genannten Beurteilungen nach Möglichkeit anhand von präoperativ erstellten Bildern.

3.2.4 Komplikationen

Neben den drei Komplikationen, welche im Fokus dieser Arbeit stehen, wurde anhand der elektronischen Patientenakte (Arztbriefe, folgende Operationsberichte, Berichte zu ambulanten Vorstellungen im Verlauf) erhoben, ob es im postoperativen Verlauf zu einem lokalen Infekt im Operationsgebiet kam. Eine Unterscheidung zwischen einem oberflächlichen und tiefen Infekt wurde dabei nicht vorgenommen.

Ebenfalls aus den vorliegenden Unterlagen wurde ermittelt, inwieweit eine Pseudarthrose des Segments L5/S1, eine kraniale Anschlussdegeneration oder eine Lockerung der in den LWK 5 und/oder SWK 1 implantierten Schrauben vorlag. Auch dies wurde der Patientenakte entnommen und/oder in postoperativ angefertigten CT-Aufnahmen ermittelt. Ausschlaggebend im CT war hier das Vorliegen eines Lockerungssaums.

3.3 Datenauswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte mittels IBM SPSS Statistics (Armonk, NY: IBM Corp.). Hierbei wurden zunächst das Messniveau der Variablen festgelegt, von dem abhängt, welche statistischen Maße erhoben werden können.

Nominale Variablen, wie z.B. die Indikation, die angewandte Operationstechnik oder das Vorhandensein einer chronischen Erkrankung, können keiner natürlichen Reihenfolge nach geordnet werden. Bei diesen Variablen wurde somit lediglich die Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägungen und somit auch der Modalwert ermittelt.

Zu ordinalen Variablen zählen hier beispielsweise die ASA-Klassifikation oder die degenerativen Veränderungen der Bandscheibe gemäß der Pfirrmann-Klassifikation. Diese weisen eine Reihenfolge auf, lassen sich jedoch nicht z.B. zu einem Mittelwert zusammenfassen, sodass auch hier Häufigkeiten und Modalwert ermittelt wurden.

Die übrigen Variablen sind als metrisch zu betrachten. Hier können die Werte in eine Reihenfolge gebracht werden und ein sinnvoller Abstand zwischen den Werten beschrieben werden (beispielsweise Alter, BMI, Schraubenlänge, Lordose der LWS in Grad). Somit lassen sich hier Mittelwert, Spannweite, Standardabweichung und Varianz berechnen. Für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit wurde insbesondere der Mittelwert betrachtet.

Die Variablen wurden sowohl in ihrer Gesamtheit betrachtet, als auch nach Vorliegen einer der untersuchten Komplikationen unterschieden und anschließend verglichen. Beispielsweise wurde das durchschnittliche Alter derjenigen Patienten, die im Verlauf eine ASD präsentierten, mit dem der Patienten verglichen, bei denen dies nicht der Fall war. Auch ein Vergleich zwischen Patienten, bei denen mindestens eine der untersuchten Komplikationen (Pseudarthrose, ASD oder Schraubenlockerung) auftraten, und den übrigen Patienten wurde erstellt.
Hierbei wurden jeweils immer Häufigkeitsverteilungen und Mittelwerte verglichen.

In einem zweiten Schritt wurden die statistischen Signifikanzen möglicher Unterschiede der Mittelwerte bzw. der zentralen Tendenzen zweier Gruppen unter Verwendung des t-Tests für unabhängige Stichproben sowie des Mann-Whitney-U-Tests berechnet.
Hierbei wurde in drei Vorgängen die Gruppen von Patienten mit Pseudarthrose, ASD und Schraubenlockerung mit den jeweils übrigen Patienten verglichen.

Voraussetzungen für die Durchführbarkeit eines t-Tests für unabhängige Stichproben ist eine Normalverteilung metrischer Variablen. Zudem muss eine Homogenität der Varianz gegeben sein.
Zunächst wurden alle metrischen Variablen mittels Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test auf ihr Normalverteilung getestet.
War diese gegeben, wurde ein t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. In diesem Rahmen erfolgte zudem ein Levene-Test, welcher die Varianzhomogenität überprüft. War auch dieses Kriterium erfüllt, konnte das Ergebnis des t-Tests verwendet werden.

Alle Variablen, welche die o.g. Voraussetzungen nicht erfüllten, jedoch zumindest ordinal skaliert sind, wurden einem Mann-Whitney-U-Test unterzogen.

Das Signifikanzniveau wurde auf je $p<0,05$ festgelegt. Die Testungen wurden für alle Variablen durchgeführt, welche die o.g. Kriterien erfüllten.

4 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie wurden wie oben genannt 100 Fälle anhand der bestehenden elektronischen Patientenakte sowie der in der Datenbank hinterlegten Datensätze bildgebender Verfahren ausgewertet.

Die unten stehende Tabelle gibt einen Überblick über das Vorliegen und den Entstehungszeitpunkt der Bilddatensätzen.

	Röntgen LWS	Röntgen GWS	CT	MRT
nicht vorliegend	6	42	7	36
präoperativ erfolgt	76	33	41	40
postoperativ erfolgt	18	25	52	24

Tabelle 1: Vorliegen und Entstehungszeitpunkt von radiologischen Aufnahmen

Diese zeigt, dass insbesondere Röntgenaufnahmen der gesamten Wirbelsäule (42%) und MRT-Aufnahmen (36%) gehäuft nicht vorlagen, wohingegen in 94% aller Fälle konventionelle Röntgenbilder der Lendenwirbelsäule einsehbar waren. Prä- oder postoperativ durchgeführte Computertomografien lagen in 93% vor.

Auch bei Parametern, deren Analyse auf Grundlage der elektronischen Patientenakte erfolgte, lagen Fälle vor, in denen kein Wert ermittelt werden konnte. Somit kommt es in den folgenden Darstellungen zu einer Diskrepanz der absoluten und relativen Werte. Die angegebenen relativen Zahlen, Mittelwerte, Mediane, Anteile etc. beziehen sich somit immer auf die Patienten, bei denen die Datenlage zu der entsprechenden Variabel vollständig war.

Im folgenden Kapitel 4.1 wird zunächst das gesamte Kollektiv beschrieben, unabhängig von dem Vorliegen einer der drei Langzeitkomplikationen. Im Weiteren erfolgt eine Gegenüberstellung derjenigen Fälle, in denen mindestens eine Komplikation vorliegt, mit den Übrigen (Kapitel **Error! Reference source not found.**). Auch wird ein Vergleich der einzelnen Langzeitkomplikationen (Pseudarthrose, ASD, Schraubenlockerung) mit den Fällen, in denen diese entsprechend nicht auftrat, durchgeführt (Kapitel 4.3, 4.4 sowie 4.5). Im letzten Kapitel 4.6 der Ergebnisdarstellung werden die Hypothesentestungen aufgeführt.

4.1 Darstellung des Gesamtkollektivs

Das untersuchte Kollektiv bestand aus 51 weiblichen und 49 männlichen Personen mit einem durchschnittlichen Alter zum Zeitpunkt der Operation von 59,4 Jahren (SD 17; Bereich 9-87). Die durchschnittliche Körpergröße betrug 1,69m (SD 0,11; Bereich 1,24-2,00) bei einem durchschnittlichen Gewicht von 79,1kg (SD 18,7; Bereich 29-127). Der BMI war im Durschnitt 27,5 kg/m^2 (SD 5,5; Bereich 17,9-41,5).

30% der Patienten (n=28) gaben zum Zeitpunkt der Operation an zu Rauchen, bei 3% war eine Osteoporose vorbeschrieben, 64% litten unter einer chronischen Krankheit. Ein Patient nahm regelmäßig Bisphosphonate ein, 5 ein orales Kortikosteroid. Das häufigste ASA-Stadium war Stadium II (n=49), gefolgt von Stadium III (n=31) und Stadium I (n=11).

Die Indikationen zur Operation waren in 64 Fällen angeborene oder degenerative Veränderungen, gefolgt von Tumoren (n=5) und entzündlichen Prozessen (n=5). Traumatische Frakturen (n=3) waren ebenso häufig Operationsindikation wie pathologische Frakturen (n=3). Weitere 18 Eingriffe erfolgten aufgrund sonstiger Indikationen, beispielsweise als Revision bei ASD oder Schraubenlockerungen.

Zu 56% wurde eine PLIF durchgeführt, gefolgt von Instrumentierungen ohne Implantation eines intervertebralen Platzhalters (25%), TLIF (13%) und ALIF (3%). In 3 weiteren Fällen wurden PLIF und ALIF kombiniert. 69 der Eingriffe erfolgten monosegmental, während 31 weitere Segmente adressierten. In 79 Prozent handelte es sich um eine primäre Instrumentierung, in 21 Prozent war bereits in der Vergangenheit die Instrumentierung des 5. LWK und/oder des 1. SWK erfolgt. Eine Dekompression erfolgte in insgesamt 79 Fällen (Laminektomie: 67, Hemilaminektomie: 7, Laminotomie 5). In den übrigen 21 Fällen wurde keine Dekompression durchgeführt. Während 62 Prozent der Eingriffe wurde ein Querverbinder implantiert. Ein Cage wurde in 70 Prozent, ein autologer Beckenkammspan in 6 Prozent der Fälle genutzt. Die durchschnittliche Länge der in LWK 5 implantierten Schrauben betrug 45,6mm bei einer relativen Schraubenlänge im Vergleich zu Größe des Wirbelkörpers von 87,7 Prozent. Die in SWK 1 implantierten Schrauben waren durchschnittlich 43,7mm lang und in 79 Prozent mindestens einseitig - in 55 Prozent beidseitig - bikortikal eingebracht. In 6 Fällen trat im postoperativen Verlauf ein lokaler Infekt auf.

Ein Überblick über die anatomischen Parameter, welche anhand der konventionellen Röntgenbilder ermittelt wurden, geht aus der nachfolgenden Tabelle 2 hervor.

	Min.	Max.	Mitt.	SD
LWS-Lordose in Grad	-2	105	39,7	18,6
Thorakale Kyphose in Grad	6	57	29,9	11,0
Thorakolumbale Kyphose in Grad	-31	31	0,2	12,6
Pelvic incidence in Grad	27	99	60,1	14,4
Sacral slope in Grad	3	60	35,8	10,9
Pelvic tilt in Grad	4	54	24,2	10,7
Overhang in mm	8	95	45,6	18,8
Bandscheibenhöhe L5/S1 in cm	0	16	8,0	3,6
Diff. LWK-5/Beckenkamm in mm	-21	42	17,78	11,4

Tabelle 2: Anatomomische Parameter des Gesamtkollektivs.
Mitt.=Mittelwert, SD=Standardabweichung

In den Wirbelsäulenganzaufnahmen zeigte sich das sagittale Profil in 17 Prozent physiologisch, in 40 Prozent nach ventral verlagert jedoch kompensiert und in 44 Prozent dekompensiert. Synostosen waren in 18 Prozent der Fälle zu erkennen.

Die Dicke des paraumbilikalen subkutanen Fettgewebes betrug durchschnittlich 24,9mm (SD 8,7; Bereich 14-50). Die mittleren Werte der Hounsfield-Einheiten des 5. Lendenwirbelkörpers waren 208 (SD 107; Bereich 63-683), des 1. Sakralwirbelkörpers 192 (SD 72; Bereich 43-396).
Ein Vakuumphänomen im Bandscheibenfach L5/S1 lag in 27 Prozent der Fälle vor (in 14 Prozent zudem kranial davon), in weiteren 16 Prozent nur kranial der Segmentes L5/S1.

Fortgeschrittene degenerative Bandscheibenveränderungen lagen zu ca. zwei Drittel vor (50% Grad IV, 16% Grad V nach Pfirrmann). In weiteren 28 Prozent zeigte sich eine Degeneration 3. Grades.
Deckplattenveränderungen gemäß der Einteilung nach Modic lagen zu 20 Prozent in Grad I, zu 43 Prozent in Grad II und zu 10 Prozent in Grad III vor.
In den vorliegenden MRT-Bildern der autochthonen Rückenmuskulatur zeigte sich in 77 Prozent der Anteil des muskulären Gewebes größer als der des fettigen bzw. narbigen Gewebes, in 8 Prozent lag ein ausgeglichenes Verhältnis vor, während in 15 Prozent der Anteil des fettigen/narbigen Gewebes überwog.

Anhand der vorliegenden Daten wurden bei 31 Patienten mindestens eine Langzeitkomplikation identifiziert. Es traten 13 Pseudarthrosen im Segments L5/S1 und

8 ASD kranial dieses Segments auf. Zudem wurden bei 23 Patienten Schraubenlockerungen im Bereich von LWK 5 und/oder SWK 1 detektiert.

4.2 Deskriptive Statistik – Vorliegen einer Langzeitkomplikation

Im Folgenden werden die Variablen hinsichtlich des Vorliegens irgendeiner der drei genannten Komplikationen analysiert. Somit wird das Kollektiv von 31 Patienten, bei denen dies der Fall war, mit den übrigen 69 Personen verglichen.

So zeigte sich im Kollektiv der Patienten mit Komplikation ein erhöhter Anteil des weiblichen Geschlechts (61,3% vs. 46,4%). Auch das Alter zum Operationszeitpunkt war im Mittel höher (63,8 vs. 57,4 Jahre). Bei Betrachtung von mittlerer Größe (166,6cm vs. 170,3cm), Gewicht (78,8kg vs. 79,3kg) und BMI (28,4 kg/m^2 vs. 27,1 kg/m^2) fielen die Unterschiede weniger deutlich aus.

Von den Patienten, welche im Verlauf eine Komplikation aufwiesen, war der Anteil der Raucher geringer (19,4% vs. 34,4%). Es zeigte sich auch ein Unterschied hinsichtlich der oralen Einnahme von Kortikosteroiden. Der Anteil bei den Patienten mit komplikativem Verlauf betrug 9,7 Prozent, wohingegen der Anteil im gegenübergestellten Kollektiv bei 3 Prozent lag. Der Anteil derjenigen Patienten, bei denen eine Osteoporose vorbekannt war, war mit ca. 3 Prozent (3,3% vs. 2,9%) vergleichbar. Die Patienten des Kollektivs mit Komplikationen wurden im Rahmen der präoperativen Untersuchung häufiger einem höheren Stadium gemäß der ASA-Klassifikation zugeordnet. So waren sowohl Stadium III (41,4% vs. 30,6%) als auch Stadium II (55,2% vs. 53,2%) häufiger vertreten. Das niedrigste Stadium I war lediglich durch einen Patienten vertreten (3,4%), im Kollektiv ohne Komplikationen hingegen durch 10 (16,1%).
Damit verbunden scheint auch der Anteil chronisch vorerkrankter Patienten, welcher im Kollektiv, das im Verlauf Komplikationen zeigte, größer war (72,4% vs. 60,6%).

Die unten stehende Grafik (Abbildung 7) zeigt die Verteilung der Indikationen in den jeweiligen Kollektiven in Prozent.

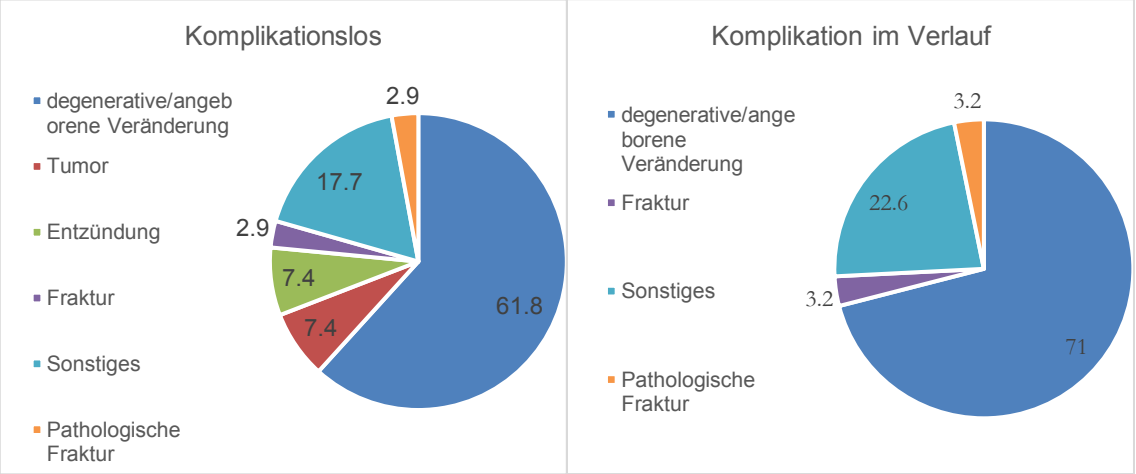


Abbildung 7: Übersicht der Indikationen im Vergleich: Komplikationslos vs. Komplikation im Verlauf

Bezüglich des operativen Verfahrens zeigten sich vor allem nach der Durchführung einer TLIF vermehrt Komplikationen. Der Anteil der Patienten, bei denen ein TLIF durchgeführt wurde, war im Kollektiv, welches Komplikationen entwickelte, deutlich höher (25,8% vs. 7,2%). Der Anteil durchgeführter PLIF war ähnlich (54,8% vs. 56,6%).

Hinsichtlich des zur Fusion genutzten Materials fiel auf, dass bei keinem der Patienten, die eine Komplikation aufwiesen, ein autologer Beckenkammspan genutzt wurde. Hingegen lag der Anteil im gegenübergestellten Kollektiv bei 9%.

Im Kollektiv, welches Komplikationen entwickelte, fielen die Dekompressionen umfassender aus. Laminektomien (71% vs. 65,2%) und Laminotomien (9,7% vs. 2,9%) wurden häufiger durchgeführt. Das Ausbleiben einer Dekompression war hingegen weniger häufig (12,9% vs. 24,6%). Hemilaminektomien wurden ähnlich häufig durchgeführt (6,5% vs. 7,2%).

Der Anteil der Fälle, bei denen der untersuche Eingriff eine Revision darstellte, war in der Gruppe der Patienten mit Komplikation im Verlauf mit 38,7 Prozent vs. 13 Prozent erhöht. Dies gilt auch für Eingriffe, die mehrere Segmente umfassten (83,9% vs. 62,3%), sowie solche, im Rahmen derer ein Querverbinder eingebracht wurde (67,7% vs. 59,4%). Ein lokaler Infekt im postoperativen Verlauf lag in dieser Gruppe ebenfalls häufiger vor (9,7% vs. 4,3%).

Die durchschnittliche Schraubenlänge im 5. LWK (46,53mm vs. 45,16mm) waren wenig größer, wobei die mittlere relative Länge im Kollektiv mit Komplikationen geringer war (85,7% vs. 88,9%). Die mittlere Schraubenlänge im 1. SWK war in beiden Gruppen mit 43,63mm vs. 43,79mm ähnlich, während in 22,6% der Fälle, in denen eine Komplikation

auftrat, keine dieser Schrauben bikortikal eingebracht wurde (vs. 14,5% im Kollektiv ohne Komplikationen).

Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der anatomischen Parameter, welche anhand der konventionellen Röntgenbilder erhoben wurden, zeigt die nachfolgende Tabelle 3.

	Komplikationslos	Komplikation im Verlauf
LWS-Lordose in Grad	41,18	36,94
Thorakale Kyphose in Grad	28,86	31,53
Thorakolumbale Kyphose in Grad	-1,16	2,48
Pelvic incidence in Grad	60,12	60,23
Sacral slope in Grad	36,63	34,17
Pelvic tilt in Grad	23,47	25,87
Overhang in mm	43,45	50,10
Bandscheibenhöhe L5/S1 in mm	8,17	7,73
Diff. LWK-5/Beckenkamm in mm	17,47	18,35

Tabelle 3: Übersicht der anatomischen Parameter im Vergleich: Komplikationslos vs. Komplikation im Verlauf

Das sagittale Profil war im Kollektiv der Patienten, welche eine Komplikation zeigten, seltener physiologisch als im Vergleichskollektiv (4,8% vs. 25,9%). Der Unterschied hinsichtlich des Vorhandenseins von Synostosen war weniger ausgeprägt (20% vs. 16,7%).

CT-morphologisch zeigte sich die Breite des subkutanen paraumbilikalen Fettgewebes in der komplikationsbehafteten Patientengruppe im Durchschnitt geringer (23,4mm vs. 26,2mm). Die durchschnittlichen Hounsfield-Einheiten waren hier ebenfalls sowohl im 5. LWK (203,2 vs. 210,8) als auch im 1 SWK (172,5 vs. 202,1) im Vergleich vermindert.
Ein Vakuumphänomen im Bandscheibenfach L5/S1 wurde in dieser Gruppe häufiger detektiert (42% vs. 13%).

Die degenerativen Veränderungen der Bandscheiben, bewertet nach der Klassifikation von Pfirrmann, waren im Kollektiv, in dem im Verlauf Komplikationen auftraten, deutlich ausgeprägter. So lag der Anteil von Veränderungen vierten oder fünften Grades hier bei 92,3%, in der Vergleichsgruppe lediglich bei 55,5%. Veränderungen gemäß Grad II und III waren hingegen deutlich seltener (7,7% vs. 40,7%).
Auch Veränderungen der Deck- und Grundplatten waren in diesem Kollektiv gehäuft erkennbar (Modic Typ I: 16,7% vs. 21,4%; Modic Typ II: 50% vs. 39,3%; Modic Typ III: 18,5% vs. 3,6%).

Die Beurteilung der autochthonen Rückenmuskulatur im MRT zeigte, dass der Anteil muskulären Gewebes in der Gruppe mit komplikativem Verlauf geringer war. Ein Überwiegen der muskulären Anteile war hier seltener (70,8% vs. 81,1%), ein Überwiegen der fettigen und narbigen Anteile (16,7% vs. 13,5%) sowie ein gleiche Ausprägung muskulärer sowie fettiger/narbiger Anteile (12,5% vs. 5,4%) häufiger zu erkennen.

Zusammenfassend fallen einige Variablen auf, deren Ausprägung sich in den beiden Gruppen deutlich zu unterscheiden scheint. Die nachfolgende Tabelle zeigt Faktoren auf, welche mit dem Auftreten von Komplikationen assoziiert werden:

	Komplika-tionslos	Komplikation im Verlauf
Weibliches Geschlecht	46,6%	61,3%
Vorliegen chronischer Erkrankungen	60,6%	72,4%
Revisionseingriffe	13,0%	38,7%
Multisegmentale Eingriffe	62,3%	83,9%
Nicht physiologisches sagittales Profil	74,1%	95,2%
Durchgeführte Laminektomien	65,2%	71,0%
Veränderungen Pfirrmann Grad IV und V	55,5%	92,3%
Überwiegen fettiger Anteile d. Rückenmuskulatur	13,5%	16,7%

Tabelle 4: Übersicht mit Komplikationen assoziierte Faktoren

4.3 Deskriptive Statistik - Pseudarthrose

Im folgenden Kapitel wird das Kollektiv der 13 Patienten, bei denen anhand der elektronischen Patientenakte sowie der vorliegenden Bildgebung eine Pseudarthrose im Segment L5/S1 detektiert wurde, den übrigen 87 Patienten gegenübergestellt.

Der Anteil der weiblichen Patienten in diesem Kollektiv war mit 46,2 Prozent geringer als in der Vergleichsgruppe (51,7%). Im Schnitt waren die Patienten zum Zeitpunkt des Eingriffs etwa ein Jahr älter (60,4 vs. 59,2 Jahre). Die mittlere Größe (169,7cm vs. 169,1cm) war in beiden Gruppen ähnlich, ebenso das Gewicht (79,25kg vs. 79,11kg) und somit auch der BMI (27,48kg/m^2 vs. 27,54 kg/m^2).

Der Anteil der rauchenden Patienten war im Kollektiv mit Pseudarthrose niedriger (16,7% vs. 32,1%). 15,4 Prozent der Patienten dieser Gruppe nahmen regelmäßig oral

Kortikosteroide zu sich, in der Vergleichsgruppe war dies bei 3,6 Prozent der Fall. Eine Osteoporose war hier bei keinem der Patienten vorbeschrieben.
Der Anteil der Patienten, welche im Rahmen der präoperativen Untersuchung der ASA-Klasse III zugeordnet wurden, war in den beiden Gruppen ähnlich (33,3% vs. 34,2%). Unterschiede zeigten sich in den Klassen I (0% vs. 13,9%) und II (66,7% vs. 51,9%). Patienten, die im Verlauf eine Pseudarthrose entwickelten, waren zudem häufiger chronisch vorerkrankt (83,3% vs. 61,4%).

Im Kollektiv, in dem eine Pseudarthrose festgestellt wurde, war die Indikation zur Operation in den meisten Fällen eine angeborene oder degenerative Veränderung der Wirbelsäule (84,6% vs. 61,6%). In je 7,7 Prozent (n=1) wurde die Indikation auf Grundlage einer pathologischen Fraktur oder sonstiger zugrundeliegender Pathologien gestellt.
Der Anteil der durchgeführten TLIF war in der Pseudarthrosen-Gruppe größer (30,8% vs. 10,3%), PLIF wurden in beiden Gruppen zu einem ähnlichen Anteil durchgeführt (53,8% vs. 56,3%). Ein postoperativer lokaler Infekt zeigte sich bei keinem der Patienten aus der Pseudarthrosen-Gruppe.

Während keiner der Eingriffe aus dem Kollektiv mit Pseudarthrose im Verlauf wurde ein autologer Beckenkammspan verwendet. Der Anteil in der Vergleichsgruppe lag bei 7,1%. Informationen über das Ausmaß der Dekompression in beiden Gruppen, sind der folgenden Tabelle 5 zu entnehmen.

Dekompression	Keine Pseudarthrose	Pseudarthrose im Verlauf
Keine Dekompression	21,8%	15,4%
Laminotomie	3,4%	15,4%
Hemilaminektomie	6,9%	7,7%
Laminektomie	67,8%	61,5%

Tabelle 5: Ausmaße der Dekompression im Vergleich: Keine Pseudarthrose vs. Pseudarthrose im Verlauf

In 46,2 Prozent der Fälle, bei denen im Verlauf eine Pseudarthrose detektiert wurde, stellte der Eingriff eine Revision im Sinne der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Definition dar. In der Vergleichsgruppe war dies lediglich in 17,2 Prozent der Fall. Auch der Anteil multisegmentaler Eingriffe war höher (76,9% vs. 67,8%). Ein Querverbinder wurde in beiden Gruppen ähnlich häufig implantiert (61,5% vs. 62,1%).
Die mittleren Längen der im 5. LWK eingebrachten Schrauben waren in beiden Gruppen ähnlich (45,97mm vs. 45,65mm), wobei die relative Schraubenlänge bezogen auf die

Größe des Wirbelkörpers im Kollektiv, welches eine Pseudarthrose zeigte, im Durchschnitt geringer war (84,77% vs. 88,37%).
Ähnlich verhält es sich auch bei der durchschnittlichen Länge der in den 1. SWK eingebrachten Schrauben (43,46mm vs. 43,78mm).
In der Pseudarthrosen-Gruppe waren dabei in weniger Fällen keine dieser Schrauben bikortikal eingebracht worden (15,4% vs. 21,7%).

Die nachfolgende Tabelle 6 stellt die mittleren anatomischen Parameter, welche anhand der konventionellen Röntgenbilder erhoben wurden, beider Gruppen gegenüber. Hier fällt eine im Vergleich verminderte mittlere lumbale Lordose im Kollektiv der Patienten auf, bei denen im Verlauf eine Pseudarthrose im Segment L5/S1 detektiert wurde (vgl. Zeile 2).

	Keine Pseudarthrose	Pseudarthrose i. Ver.
LWS-Lordose in Grad	41,04	31,85
Thorakale Kyphose in Grad	30,51	26,74
Thorakolumbale Kyphose in Grad	0,16	2,86
Pelvic incidence in Grad	60,83	56,15
Sacral slope in Grad	36,62	31,00
Pelvic tilt in Grad	24,22	24,54
Overhang in mm	44,99	49,69
Bandscheibenhöhe L5/S1 in mm	8,03	8,04
Diff. LWK-5/Beckenkamm in mm	16,97	22,44

Tabelle 6: Übersicht der anatomischen Parameter im Vergleich: Keine Pseudarthrose vs. Pseudarthrose im Verlauf

Das sagittale Profil war in der Pseudarthrosen-Gruppe bei keinem der Patienten physiologisch, in der Vergleichsgruppe bei 19,5%. Auch bei den ventralisierten Profilen zeigten sich Unterschiede (kompensiert 42,9% vs. 39%, dekompensiert 57,1% vs. 41,5%). Synostosen waren in dieser Gruppe ebenfalls häufiger zu erkennen (23,1% vs. 16,9%).

Die anhand der CT-Datensätze erhobenen durchschnittlichen Werte der Hounsfield-Einheiten von LWK 5 und SWK 1 sowie die mittlere Dicke des paraumbilikalen subkutanenen Fettgewebes können der nachfolgenden Tabelle 7 entnommen werden. Hier zeigt sich eine Diskrepanz hinsichtlich der Hounsfield-Einheiten. Im Pseudarthrosen-Kollektiv sind diese vergleichend im 5. LWK höher, im 1. SWK hingegen niedriger als in der Vergleichsgruppe.

	Keine Pseudarthrose	Pseudarthrose im Verlauf
HU LWK 5	204,53	228,92
HU SWK 1	194,57	177,08
Dicke d. Subkutangewebes	25,21mm	23,00mm

Tabelle 7: Übersicht der CT-morphologischen Paremeter im Vergleich: Keine Pseudarthrose vs. Pseudarthrose im Verlauf

Ein Vakuumphänomen im Bandscheibenfach L5/S1 lag bei den Patienten, bei denen im Verlauf eine Pseudarthrose detektiert wurde, deutlich häufiger vor (69,2% vs. 20,3%).

Ebenso waren lagen höhergradige Bandscheibenveränderungen gemäß der Klassifikation nach Pfirrmann im Pseudarthrosen-Kollektiv deutlich häufiger vor (Grad IV 83,3% vs. 44,1%; Grad V 16,7% vs. 17,6%).

Auch Veränderungen der Deck- und Grundplatten waren häufiger zu sehen, wie die nachfolgende Tabelle 8 zeigt.

Einteilung nach Modic	Keine Pseudarthrose	Pseudarthrose im Verlauf
Typ I (%)	20,6	16,7
Typ II (%)	41,2	50,0
Typ III (%)	5,9	33,3

Tabelle 8: Übersicht der Deckplattenveränderungen im Vergleich: Keine Pseudarthrose vs. Pseudarthrose im Verlauf

Das Auftreten einer Pseudarthrose ist zudem assoziiert mit einem schlechteren Zustand der autochthonen Rückenmuskulatur. Überwog bei Patienten mit dieser Komplikation der Anteil fettigen oder narbigen Gewebes in 30 Prozent der Fälle, war dies in der Vergleichsgruppe bei 11,8 Prozent zu erkennen.

Darüber hinaus korreliert das Vorliegen einer Pseudarthrose scheinbar mit dem Vorliegen einer weiteren Komplikation. So wurden im Kollektiv mit Pseudarthrose sowohl mehr Schraubenlockerungen (69,2% vs. 19,2%) als auch mehr ASD (23,1% vs. 5,7%) festgestellt.

Zusammenfassend fallen bei den vorliegenden Daten einige Variablen auf, welche mit dem Auftreten einer Pseudarthrose assoziiert sind. Diese werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	Keine Pseud-arhtrose	Pseudarthrose im Verlauf
Fehlendes Verwenden eines autologen Beckenkammspan	92,9%	100%
Revisionseingriffe	17,2%	46,2%
Multisegmentale Eingriffe	67,8%	76,9%
Nicht physiologisches sagittales Profil	80,5%	100%
Verminderte Lordose	41,04°	31,85°
Veränderungen Pfirrmann Grad IV	44,1%	83,3%
Vorliegen eines Vakuumphänomens	20,3%	69,2%
Vorliegen Schraubenlockerung	19,2%	69,2%
Vorliegen ASD	5,7%	23,1%

Tabelle 9: Übersicht mit Pseudarthrose assoziierte Faktoren

4.4 Deskriptive Statistik - ASD

Im folgenden Kapitel wird das Kollektiv der 8 Patienten, bei denen anhand der elektronischen Patientenakte sowie der vorliegenden Bildgebung eine ASD kranial des Segment L5/S1 detektiert wurde, den übrigen 92 Patienten gegenübergestellt.

Der Anteil weiblicher Patienten war in diesem Kollektiv mit 62,5% höher, als im Vergleichskollektiv, in dem eine ausgeglichene Geschlechterverteilung vorlag (50%). Die Patienten waren zum Zeitpunkt der Operation durchschnittlich älter (64,6 Jahre vs. 58,9 Jahre). Die Unterschiede hinsichtlich mittlerer Größe (168,1cm vs. 169,3cm), Gewicht (76,4kg vs. 79,4kg) und BMI (27,0kg/m^2 vs. 27,6kg/m^2) fielen weniger deutlich aus.

Der Anteil von zum Operationszeitpunkt aktiven Rauchern war im Kollektiv mit ASD größer (37,5% vs. 29,4%), ebenso der Anteil von Patienten, welche regelmäßig oral Kortikosteroide einnahmen (12,5% vs. 4,5%). Eine vorbeschriebene Osteoporose lag bei keinem dieser Patienten vor, bei 3,3 Prozent im Vergleichskollektiv. Im Rahmen der präoperativen Einschätzung des gesundheitlichen Zustands, wurden die Patienten des o.g. Kollektivs häufiger höheren Stadien zugeordnet (ASA III 37,5% vs. 33,7%; ASA II 62,5% vs. 53,0%; ASA I 0% vs. 13,3%). Der Anteil chronisch vorerkrankter Patienten war in beiden Gruppen ähnlich groß (62,5% vs. 64,4%).

Die Operationsindikation war in der ASD-Gruppe zur 87,5 Prozent (n=7) eine degenerative oder angeborene Veränderung der Wirbelsäule. Dem gegenüber steht ein Anteil von 62,6 Prozent der Patienten mit gleicher Indikation, bei denen diese Komplikation nicht auftrat.
Die Häufigkeitsverteilung der in den beiden Gruppen angewandten Operationsverfahren war ähnlich (PLIF 62,5% vs. 55,4%; TLIF 12,5% vs. 13%, dorsale Instrumentierung ohne Implantation eines intervertebralen Platzhalters 25,0% vs. 25,0%). Eine ALIF (0% vs. 3,3%) oder eine Kombination von ALIF und PLIF (0% vs. 3,3%) erfolgte nur in der Gruppe, welche im Verlauf keine ASD aufwies. Auch wurde nur in dieser Gruppe ein autologer Beckenkammspan verwendet (0% vs. 6,7%)

Das Ausmaß der Dekompression in den jeweiligen Gruppen ist in der folgenden Tabelle 10 dargestellt. Auch hier wurde zusammenfassend ein ausgiebigere Dekompression bei den Patienten durchgeführt, welche im Verlauf eine ASD entwickelten.

Dekompression	Keine ASD	ASD im Verlauf
Keine Dekompression	21,7%	12,5%
Laminotomie	4,3%	12,5%
Hemilaminektomie	7,6%	0%
Laminektomie	66,3%	75,0%

Tabelle 10: Ausmaße der Dekompression im Vergleich: Keine ASD vs. ASD im Verlauf

Bei diesen Patienten stellte der Eingriff zudem häufiger eine Revision dar (25,0% vs. 20,7%). Multisegmentale Eingriffe wurden hier ebenfalls häufiger durchgeführt (75,0% vs. 68,5%) und vermehrt Querverbinder eingebracht (87,5% vs. 59,8%).

Einen vergleichenden Überblick, über die Analyse der implantierten Schrauben zeigt die folgende Tabelle 11.

	Keine ASD	ASD im Verlauf
∅ Schraubenläge L5 (mm)	45,69	44,07
∅ Relative Länge L5 (%)	88,41	81,29
∅ Schraubenlänge S1 (mm)	43,83	41,82

Tabelle 11: Mittlere (relative) Schraubenlänge im Verleich: Keine ASD vs. ASD im Verlauf

Im Kollektiv der Patienten, welche im Verlauf eine ASD aufwiesen, wurde häufiger keine der in den 1. SWK implantierten Schrauben bikortikal eingebracht (28,6% vs. 20%).

Ein physiologisches sagittales Profil zeigte sich in der o.g. Gruppe bei keinem der Patienten (0% vs. 19%), eine kompensierte Ventralisierung lag häufiger vor (83,3% vs. 33,0%), eine dekompensierte Situation seltener (16,7% vs. 47,6%).
Synostosen waren in beiden Gruppen ähnlich häufig zu erkennen (14,3% vs. 18%).

Die weiteren, anhand der konventionellen Röntgenbilder erhobenen Parameter werden in der unten stehenden Tabelle 12 abgebildet. Hier fällt eine im Durchschnitt um ca. 4mm verminderte Höhe der Bandscheibe L5/S1 in der Gruppe auf, welche im Verlauf eine ASD entwickelte.

	Keine ASD	ASD im Verlauf
LWS-Lordose in Grad	39,64	40,63
Thorakale Kyphose in Grad	29,95	30,20
Thorakolumbale Kyphose in Grad	0,62	-3,00
Pelvic incidence in Grad	60,34	58,25
Sacral slope in Grad	36,05	33,38
Pelvic tilt in Grad	24,27	24,25
Overhang in mm	45,71	45,25
Bandscheibenhöhe L5/S1 in mm	8,39	4,44
Diff. LWK-5/Beckenkamm in mm	17,70	18,59

Tabelle 12: Übersicht der anatomischen Parameter im Vergleich: Keine ASD vs. ASD im Verlauf

Die Messungen der durchschnittlichen Werte der Hounsfield-Einheiten von LWK 5 und SWK 1 sowie die mittlere Dicke des paraumbilikalen subkutanenen Fettgewebes, welche in den vorliegenden CT-Bilddatensätzen durchgeführt wurden, werden in der nachfolgenden Tabelle 13 dargestellt. Hier zeigen sich durchschnittlich höhere HU-Werte im Kollektiv, bei dem eine ASD nachgewiesen wurde.

	Keine ASD	ASD im Verlauf
HU LWK 5	206,01	229,75
HU SWK 1	191,31	198,75
Dicke d. Subkutangewebes	24,67mm	26,00mm

Tabelle 13: Übersicht der CT-morphologischen Paremeter im Vergleich: Keine ASD vs. ASD im Verlauf

Ein im CT erkennbares Vakuumphänomen wurde in der o.g. Gruppe deutlich häufiger detektiert, als in der Vergleichsgruppe (50% vs. 26,89%).

In der ASDs-Gruppe zeigten sich ausschließlich höhergradige Veränderungen der Bandscheibe L5/S1, welche folglich häufiger Vorlagen, als bei denjenigen Patienten, welche im Verlauf keine ASD aufwiesen (Grad IV 80% vs. 45,7%; Grad V 20% vs. 17,1%).

Die Häufigkeiten der Veränderungen der der Bandscheibe L5/S1 angrenzenden Deck- und Grundplatten wird in der folgenden Tabelle 14 abgebildet.

Einteilung nach Modic	Keine ASD	ASD im Verlauf
Typ I (%)	20,0	20,0
Typ II (%)	40,0	60,0
Typ III (%)	8,6	20,0

Tabelle 14: Übersicht der Deckplattenveränderungen im Vergleich: Keine ASD vs. ASD im Verlauf

Der Zustand der autochthonen Rückenmuskulatur war im ASDs-Kollektiv vergleichend besser. Ein Überwiegen der muskulären Anteile war häufiger (87,5% vs. 75,5%), ein Überwiegen fettiger oder narbiger Anteile seltener (12,5% vs. 15,1%) zu sehen.

Eine nachgewiesene ASD ist zudem assoziiert mit dem Auftreten einer der anderen, im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Komplikationen. Sowohl Schraubenlockerungen (50% vs. 24,4%) als auch Pseudarthrosen (62,5% vs. 10,9%) wurden in diesem Kollektiv häufiger nachgewiesen.

Wie auch in Kapitel 4.3 lassen sich auf Grundlage der vorliegenden Daten einige Variablen hervorheben, welche mit dem Auftreten einer ASD assoziiert sind. Diese werden in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst:

	Keine ASD	ASD im Verlauf
Anteil von Rauchern	29,4%	37,5%
Durchgeführte Laminektomie	66,3%	75%
Kürzere relative Länge LWK-5-Schrauben	81,29%	88,41%
Nicht bikortikal eingebrachte SWK-1-Schrauben	20,0%	28,6%
Vorliegen eines Vakuumphänomens	26,89%	50,0%
Veränderungen Pfirrmann Grad IV	45,7%	80,0%

Tabelle 15: Übersicht mit ASD assoziierte Faktoren

4.5 Deskriptive Statistik - Schraubenlockerung

In diesem Kapitel wird das Kollektiv der 23 Patienten, bei denen anhand der elektronischen Patientenakte sowie der vorliegenden Bildgebung eine Schraubenlockerung im Segment L5/S1 detektiert wurde, den 63 Patienten, bei denen auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten keine Schraubenlockerung vorlag. 14 Patienten konnten nicht berücksichtigt werden, da hier keine eindeutige Datenlage vorhanden war.

Der Anteil weiblicher Patienten war in diesem Kollektiv größer, als im Kollektiv ohne Schraubenlockerung (69,6% vs. 46%). Auch hier waren die Patienten im Mittel älter (64,6 Jahre vs. 55,7 Jahre). Zudem waren diese durchschnittlich kleiner (165,86cm vs. 170,18cm) und leichter (77,91kg vs. 79,66kg), jedoch wiesen sie einen höheren mittleren BMI auf (28,32kg/m^2 vs. 27,28kg/m^2).

Der Anteil der aktiven Raucher war im Kollektiv, welches im Verlauf eine Schraubenlockerung zeigte geringer (13,6% vs. 40,4%), der Anteil von Patienten, welche regelmäßig oral Kortikosteroide einnahmen, größer (8,7% vs. 3,3%).
Eine vorbeschriebene Osteoporose lag bei einem dieser Patienten vor (4,5%), in der Vergleichsgruppe war bei keinem Patienten eine Osteoporose vorbekannt. Zudem wurden die Patienten des Schraubenlockerungs-Kollektiv im Rahmen der präoperativen Untersuchung tendenziell einem höheren ASA-Stadium zugeordnet (ASA I 4,5% vs. 14,5%; ASA II 54,5% vs. 63,6%; ASA III 40,9% vs. 21,8%). Auch waren hier mehr Patienten chronisch vorerkrankt (77,3% vs. 55,9%).

Die häufigsten Operationsindikationen im Kollektiv der Patienten mit Schraubenlockerung waren degenerative oder angeborene Veränderungen (65,2% vs. 67,7%) sowie sonstige Pathologien (26,1% vs. 14,5%). Zudem in jeweils einem Fall eine pathologische (4,5% vs. 3,2%) sowie eine traumatische Fraktur (4,3% vs. 1,6%).
Am häufigsten wurden hier PLIF durchgeführt (56,5% vs. 58,7%), gefolgt von TLIF (26,1% vs. 9,5%) sowie Instrumentierungen ohne Implantation eines Platzhalters in das Bandscheibenfach (17,4% vs. 23,8%). Ein autologer Beckenkammspan wurde in keinem der Fälle verwendet (0% vs. 8,4%).

Der Umfang der Dekompression in den beiden Gruppen ist der in der unten stehenden Tabelle 16 dargestellt. Auch hier scheint eine Tendenz zu einer ausgiebigeren Dekompression im Kollektiv mit Schraubenlockerung vorzuliegen.

Dekompression	Keine Schraubenlockerung	Schraubenlockerung im Verlauf
Keine Dekompression	20,6%	8,7%
Laminotomie	3,2%	13,0%
Hemilaminektomie	7,9%	4,3%
Laminektomie	68,3%	73,9%

Tabelle 16: Ausmaße der Dekompression im Vergleich: Keine Schraubenlockerung vs. Schraubenlockerung im Verlauf

Der Anteil der Patienten, bei denen der untersuchte Eingriff eine Revision darstellte, war im o.g. Kollektiv deutlich höher (39,1% vs. 14,3%). Zudem handelte es sich sichtbar häufiger um einen multisegmentalen Eingriff (91,3% vs. 58,7%). Ein Querverbinder wurde ebenfalls häufiger implantiert (73,9% vs. 58,7%). Ein postoperativer, lokaler Infekt lag bei Patienten mit Schraubenlockerung häufiger vor als in der Vergleichsgruppe (13% vs.1,6%).

Ein Vergleich der implantierten Schrauben ist der nachfolgenden Tabelle 17 zu entnehmen.

	Keine Schraubenlockerung	Schraubenlockerung im Verlauf
∅ Schraubenläge L5 (mm)	44,43	46,42
∅ Relative Länge L5 (%)	88,26	86,35
∅ Schraubenlänge S1 (mm)	43,86	43,59

Tabelle 17: Mittlere (relative) Schraubenlänge im Verleich: Keine Schraubenlockerung vs. Schraubenlockerung im Verlauf

Im Kollektiv der Patienten, die im Verlauf eine Schraubenlockerung aufwiesen, war in 19 Prozent der Fälle keine der beiden Schrauben bikortikal im SWK eingebracht worden. In der Vergleichsgruppe lag dies in 21,7% der Fälle vor.

Das sagittale Profil der Patienten mit Schraubenlockerung im Verlauf war weniger häufig physiologisch (6,3% vs. 21,7%) und bei Ventralisierung kompensiert (31,3% vs. 47,8%). Hingegen war diese deutlich häufiger dekompensiert (62,5% vs. 30,4%).
Synostosen zeigten sich in ebenfalls häufiger (22,7% vs. 16,4%).

Die übrigen, anhand der konventionellen Röntgenbilder erhobenen anatomischen Parameter, sind in der untenstehenden Tabelle 18 abgebildet. Hier fällt insbesondere ein größerer mittlerer Overhang im Kollektiv mit Schraubenlockerung auf.

	Keine Schraubenlockerung	Schraubenlockerung im Verlauf
LWS-Lordose in Grad	40,79	38,26
Thorakale Kyphose in Grad	27,36	32,20
Thorakolumbale Kyphose in Grad	-1,87	2,31
Pelvic incidence in Grad	60,16	62,95
Sacral slope in Grad	35,69	35,95
Pelvic tilt in Grad	24,35	26,68
Overhang in mm	45,04	51,82
Bandscheibenhöhe L5/S1 in mm	7,69	8,23
Diff. LWK-5/Beckenkamm in mm	17,67	17,42

Tabelle 18: Übersicht der anatomischen Parameter im Vergleich: Keine Schraubenlockerung vs. Schraubenlockerung im Verlauf

Die mittleren Werte der Hounsfield-Einheiten in den Wirbelkörpern LWK 5 und SWK 1 und der Dicke des paraumbilikalen subkutanen Fettgewebes sind in der nachfolgenden Tabelle 19 aufgeführt. Hier sind alle Mittelwerte in der Gruppe ohne Schraubenlockerung deutlich höher.

	Keine Schraubenlockerung	Schraubenlockerung im Verlauf
HU LWK 5	217,59	175,24
HU SWK 1	201,56	165,86
Dicke d. Subkutangewebes	28,83mm	21,86mm

Tabelle 19: Übersicht der CT-morphologischen Paremeter im Vergleich: Keine Schraubenlockerung vs. Schraubenlockerung im Verlauf

Ein Vakuumphänomen im Bandscheibenfach L5/S1 zeigte sich im Kollektiv mit Schraubenlockerung im Verlauf deutlich häufiger (47,6% vs. 20,4%).

Im o.g. Kollektiv zeigten sich zudem scheinbar tendenziell höhergradige Veränderungen der Bandscheibe L5/S1 gemäß der Klassifikation nach Pfirrmann als in der Vergleichsgruppe (Grad V 22,2% vs. 20,8%; Grad IV 66,7%% vs. 45,8%; Grad III 11,1% vs. 29,2%).

Die Verteilung der Veränderungen der der Bandscheibe L5/S1 angrenzenden Deck- und Grundplatten ist in der unten stehenden Tabelle 20 abgebildet.

Einteilung nach Modic	Keine Schraubenlockerung	Schraubenlockerung im Verlauf
Typ I (%)	24,0	12,5
Typ II (%)	40,0	50,0
Typ III (%)	8,0	25,0

Tabelle 20: Übersicht der Deckplattenveränderungen im Vergleich: Keine Schraubenlockerung vs. Schraubenlockerung im Verlauf

Im Vergleich des Zustandes der autochthonen Rückenmuskulatur zeigte sich in der Patientengruppe mit Schraubenlockerung weniger häufig ein Überwiegen der muskulären Anteile (70,6% vs. 80,0%). Ein ausgewogenes Verhältnis bestand häufiger (17,6% vs. 5,7%), ein höherer Anteil fettigen oder narbigen Gewebes seltener (11,8% vs. 14,3%).

Auch die vermehrte Vergesellschaftung mit anderen Komplikationen zeigte sich bei den Patienten mit Schraubenlockerung. Sowohl eine Pseudarthrose (39,1% vs. 6,3%) als auch eine ASD (17,4% vs. 6,3%) lagen häufiger vor als im zu vergleichenden Kollektiv.

Zusammenfassend zeigen sich auch hier Variablen, welche mit dem Auftreten einer Schraubenlockerung assoziiert sind.

	Keine Schrauben-lockerung	Schrauben-lockerung im Verlauf
Weibliches Geschlecht	46,0%	69,9%
ASA-Stadium III	21,8%	63,6%
Vorliegen chronischer Erkrankungen	55,9%	77,3%
Laminektomie	3,2%	13,0%
Multisegmentale Eingriffe	58,7%	91,3%
Fehlendes Verwenden eines autologen Beckenkammspan	91,6%	100%
Postoperativer Infekt	1,6%	13,0%
Vergrößerter Overhang	45,04mm	51,82mm
Dekompensiertes sagittales Profil	30,4%	62,5%
Verminderte HU-Einheiten LWK 5	217,59	175,24
Vermindere HU-Einheiten SWK 1	201,56	165,86
Vorliegen eines Vakumphänomens	20,4%	47,6%

Tabelle 21: Übersicht mit Schraubenlockerung assoziierte Faktoren

4.6 Hypothesentests

Nachdem die Ergebnisse der deskriptiven Statistik in den Kapiteln 4.2 bis 4.5 dargestellt wurden, welche die genannten Unterschiede zwischen den entsprechenden Gruppen zeigten, folgt in diesem Kapitel die Darstellung der weiterführenden Berechnungen sowie statistisch signifikanter Unterschiede.

In den vorbereitenden Tests auf Normalverteilung zeigte sich bei den in Tabelle 22 (siehe Anhang) aufgeführten metrischen Variablen sowohl im Kolmogorov-Smirnov-Test als auch im Shapiro-Wilk-Test eine Signifikanz von >0,05. Die gilt leidglich nicht für die Höhe der Bandscheibe L5/S1. Somit war die Durchführung eines t-Tests für die Bandscheibenhöhe nicht möglich. Die Ergebnisse der o.g. Tests sind der Tabelle 22 im Anhang zu entnehmen. Für die übrigen Parameter wurde somit ein T-Test durchgeführt.

Im Folgenden werden diejenigen t-Test und Mann-Whitney-U-Tests aufgeführt, welche eine statistische Signifikanz mit $p<0,05$ aufwiesen.

Vergleich Pseudarthrose

Eine Signifikanz von $p<0,05$ zeigte sich im Mann-Whitney-U-Test für Deckplattenveränderungen. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass die Verteilung der Deckplattenveränderungen in den beiden Kollektiven (Patienten mit Pseudarthrose vs. Patienten ohne Pseudarthrose) signifikant verschieden ist: Mann-Whitney-U Test, U=155,500, p=0,032.

Vergleich ASD

Es zeigte sich, dass Patienten mit einer ASD im Verlauf eine kürzere relative Schraubenlänge in Prozent aufwiesen (M=81,29, SD=11,146, n=7), als Patienten, welche keine ASD entwickelten (M=88,41, SD=7,734, n=71): t(85)=3,087, p=0,029.

Zudem war die Verteilung der Höhe der Bandscheibe L5/S1 in den beiden Gruppen signifikant verschieden: Mann-Whitney-U-Test, U=107,500, p=0,002. Eine Übersicht über diese ist der nachfolgenden Abbildung 8 zu entnehmen.

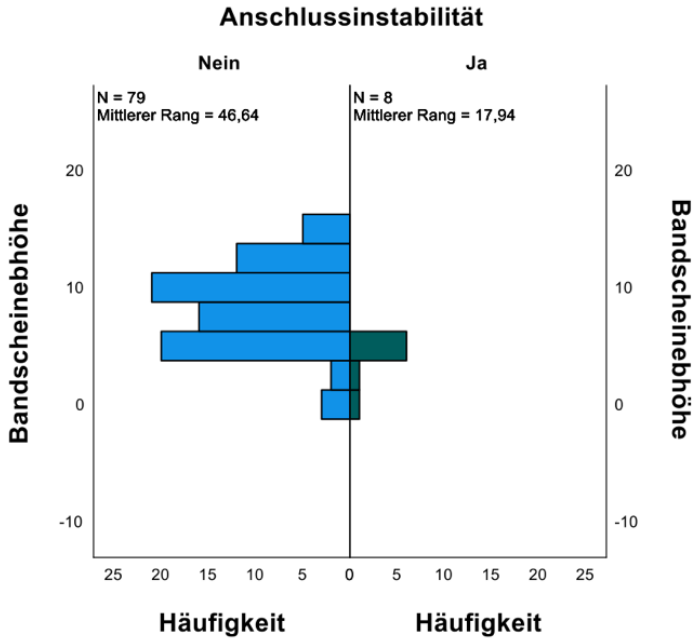


Abbildung 8: Verteilung der Bandscheibenhöhe im Vergleich: Keine Anschlussimstabilität vs. ASD im Verlauf

Vergleich Schraubenlockerung

Hier zeigte sich, dass Patienten mit einer Schraubenlockerung im Verlauf im Mittel signifikant älter waren (M=64,6, SD=15,167, n=23), als Patienten, welche keine Schraubenlockerung aufwiesen (M=55,72, SD=16,330, n=63): t(84)= 2,273, p=0,026.

Zudem waren die Werte der Hounsfield-Einheiten im SWK 1 in diesem Kollektiv im durchschnittlich signifikant niedriger (M=165,86, SD=73,66, n=22) als im zu vergleichenden Kollektiv (M=201,56, SD=70,64, n=59): t(79)=-2,000, p=0,049.

Die übrigen t-Tests sowie Mann-Whitney-U-Tests zeigten keine signifikanten Unterschiede in den jeweils verglichenen Gruppen.

5 Diskussion

5.1 Pseudarthrose

Auch wenn nicht jede Pseudarthrose zu relevanten Beschwerden führt, scheint das Vorliegen einer solchen einen negativen Einfluss auf das klinische Ergebnis und die Patientenzufriedenheit zu haben, was teils mit operativem Handlungsbedarf und so auch mit den Risiken eines erneuten Eingriffs für den Patienten einhergeht[69,70].
Um die Rate von Pseudarthrosen weiter zu vermindern sind neben sorgfältiger Planung und Ausführung des entsprechenden Eingriffs auch die Berücksichtigung möglicher Risikofaktoren von großem Stellenwert um die bestmögliche Patientenversorgung sicherzustellen.

Hier sind bereits bei Indikationsstellung der gesundheitliche Gesamtzustand sowie Veränderungen der Wirbelsäule, insbesondere auch des lumbosakralen Übergangs zu berücksichtigen.
So scheinen chronische Vorerkrankungen gemäß den vorliegenden Daten mit Pseudarthrosen assoziiert zu sein. Auch die Einnahme von Glukokortikoiden wurde in der Pseudarthrosen-Gruppe häufiger beobachtet, was sich mit bisherigen Erkenntnissen deckt[76]. Der in verschiedenen Arbeiten beschriebene negative Einfluss von Rauchen auf die Fusionsrate konnte in dieser Arbeit nicht abgebildet werden[72,73]. Der Anteil von Rauchern war in dem Kollektiv mit Pseudarthrose geringer. Etablierte Dauermedikationen sowie gesundheitsschädliches Verhalten der Patienten sollten somit in die Indikationsstellung einbezogen werden.
Auch konnten fortgeschrittene degenerative Veränderungen bei den untersuchten Patienten mit aufgetretener Pseudarthrose häufiger detektiert werden als bei Patienten mit erfolgter knöcherner Fusion.
Hierbei sind zunächst Deckplattenveränderungen nach Modic zu nennen, welche sich in den beiden verglichenen Patientengruppen signifikant unterschieden. Hierbei lag bei Patienten mit Pseudarthrose vor allem eine Veränderung von Typ III häufiger vor, welche eine Sklerose darstellt[114,115]. Bei diesen Patienten sollte besonderes auf das suffiziente Anfrischen der Deck- und Grundplatte zur Abtragung dieser Sklerose geachtet werden. Eine entsprechende präoperative Beurteilung der i.d.R. vorliegenden MRT-Bildgebung ist somit zu empfehlen.
Weitere degenerative Veränderungen, wie beispielsweise Veränderungen der Bandscheiben gemäß der Klassifikation nach Pfirrmann wurden ebenfalls häufiger bei Pseudarthrosen beobachtet, was die oben genannte Einschätzung unterstreicht. Ein schlechterer Zustand der autochthonen Rückenmuskulatur, ein im Segment L5/S1

vorliegendes Vakuumphänomen und Synostosen lagen bei Patienten, bei denen eine Pseudarthrose detektiert wurde häufiger vor. Hier sind also die Indikationsstellung von großer Bedeutung und alternative Therapieansätze zu berücksichtigen. Gleiches gilt auch für Patienten, welche bereits am lumbosakralen Übergang mittels Instrumentierung voroperiert sind. Zudem könnte die präoperative Stärkung der autochthonen Rückenmuskulatur ein möglicher Ansatzpunkt sein.

Der Blick auf die Erhebung der spinopelvinen Parameter zeigt geringere Werte für Pelvic Incidence und Sacal Slope bei Patienten mit Pseudarthrose. Dies deckt sich mit den Erhebungen von Han et al. aus dem Jahr 2015, der hier jedoch keine Signifikanz für einen negativen Einfluss dieser auf die Fusionsrate darlegen konnte[77].
Eine geringere Lendenlordose war ebenfalls in oben genannter Gruppe zu beobachten. Diese könnte auf einen verringerten Kompressionsdruck zwischen LWK 5 und SWK 1 und somit auch auf das eingebrachte Implantat, was sich wiederum negativ auf die knöcherne Fusion auswirkt[118].

Bezüglich des durchgeführten Eingriffes zeigte sich im untersuchten Kollektiv, dass bei Patienten, die eine Pseudarthrose entwickelten, häufiger mehr als nur das Segment L5/S1 adressiert wurde. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus der bisherigen Literatur, in der bei monosegmentalen Eingriffen eine höhere Fusionsrate beschrieben wird[9,78]. Inwieweit die Notwendigkeit eines multisegmentalen Eingriffes besteht, sollte entsprechend genauestens eruiert werden. Das Ausmaß der durchgeführten Dekompression scheint im untersuchten Kollektiv hingegen keinen wesentlichen Einfluss auf das Auftreten einer Pseudarthrose zu haben.

Auch die für Revisionseingriffe beschriebene verminderte Pseudarthrosenrate nach Verwendung eines autologen Transplantats zeigt sich im untersuchten Kollektiv[79]. So wurde bei keinem der Patienten, bei denen eine Pseudarthrose auftrat, ein autologer Knochenspan verwendet. Die Verwendung von Autografts ist jedoch differenziert zu betrachten, da hier weitere Operationsrisiken bestehen und ein besseres klinisches Ergebnis, verglichen mit verwendeten Allografts nicht nachgewiesen werden konnten.
Von den untersuchten Patienten, die im Verlauf eine Pseudarthrose aufwiesen, wurde ein größerer Anteil mittels TLIF operiert (30,8% vs. 10,3%), wohingegen der Anteil der durchgeführten PLIF in beiden Gruppen etwa gleich war (53,8% vs. 56,3%). Diese scheinbare Unterlegenheit der TLIF lässt sich in der aktuellen Literatur nicht wiederfinden. Sousilan und Patel beschreiben in einem Review von 2021 Fusionsraten von 97 Prozent bei der PLIF und 94 Prozent bei einer TLIF[119]. Eine mögliche Erklärung

für diese Diskrepanz könnte die Erfahrung der tätigen Operateure mit den verschiedenen Techniken sein. In einem weiteren Review von de Kunder et al. wurden 450 TLIF mit 540 PLIF verglichen. Es zeigte sich eine Überlegenheit der TLIF hinsichtlich der Komplikationsrate, dem Blutverlust und der OP-Dauer bei ähnlichen klinischen Ergebnissen[65]. Die Auswahl des verwendeten Eingriffes hängt also neben der Indikation (vgl. Kapitel 2.4) maßgeblich von der Erfahrung und den technischen Fertigkeiten des Operateurs ab.

5.2 ASD

Neben der Pseudarthrose stellt auch die ASD eine Langzeitkomplikation dar, welche nicht selten zu Folgeeingriffen führt. So beschrieben Ghiselli et al. eine 10-Jahres-Prävalenz von 36,1 Prozent für eine ASD. Wiederum war bei über einem Viertel der Patienten, nämlich 27,4 Prozent, eine Folgeoperation notwendig[90]. Die ASD ist somit als relevante Komplikation zu betrachten. Mögliche Risikofaktoren für ihre Entstehung sollten somit bei der Therapie von Wirbelsäulenpathologien berücksichtigt werden.

Im untersuchten Kollektiv lag eine ASD bei lediglich 8 Prozent der Patienten vor, was sich deutlich von der in der Literatur beschriebenen ASD-Rate unterscheidet. Ursächlich ist möglicherweise der kürzere Beobachtungszeitraum. In vielen Arbeiten wird ein Follow-up von 10 Jahren zugrunde gelegt.

Durch die geringe Zahl von 8 Patienten mit ASD im Verlauf ist entsprechend auch die Aussagekraft der untersuchten Variablen eingeschränkt. Trotzdem zeigen sich mitunter Tendenzen.

Während der Einfluss von Rauchen, Geschlecht und einem höheren Alter zum Zeitpunkt der Operation in der Literatur teils widersprüchlich eingeschätzt wird[10], zeigt sich in der ASD-Gruppe sowohl ein größerer Anteil an Rauchern (37,5% vs. 29,4%) und von Frauen (62,5% vs. 50%) als auch ein im Durchschnitt höheres Alter (64,6 Jahre vs. 58,9 Jahre). Ein höherer BMI war im untersuchten Kollektiv nicht mit dem Auftreten einer ASD assoziiert, was sich mit Ergebnissen der Literatur deckt[87]. Das Alter ist somit nicht nur vor dem Aspekt einer ASD bei der Indikationsstellung stets als relevanter Faktor mit einzubeziehen. Auch aktives Rauchen, welches mit vielen weiteren Komplikationen einhergeht, sollte berücksichtigt werden. Patienten sollten hier explizit über den negativen Einfluss des Konsums aufgeklärt werden.

Unter der Annahme, dass eine klinisch relevante ASD aus Anschlusssegmentdegenerationen hervorgeht, lässt sich die These ableiten, dass bereits vorbestehende Veränderungen vermehrt mit einer ASD einhergehen. In der Literatur sind auch hier unterschiedliche Ergebnisse zu finden. Während in Arbeiten von Okuda et al. oder Lee et at. vorbestehende Degenerationen der Facettengelenke oder

Bandscheiben als Risikofaktor einer ASD beschrieben werden, konnten auch im vorliegenden Kollektiv einige degenerative Veränderungen festgestellt werden, welche bei Patienten mit ASD häufiger auftraten als in der Vergleichsgruppe. Limitierend ist hier jedoch zu sagen, dass meist das Segment L5/S1 betrachtet wurde. Unter der Annahme, dass Degenerationen aber selten ein einzelnes Segment betreffen, können folgende Faktoren beschrieben werden: Bei Patienten mit ASD im Verlauf war in CT-Aufnahmen häufiger ein Vakuumphänomen feststellbar, die mittlere Bandscheibenhöhe im operierten Segment L5/S1 war deutlich kleiner (8,39mm vs. 4,44mm) und es zeigten sich häufiger höhergradige Bandscheibenveränderungen. Es ist also zu erwägen, inwieweit degenerative Veränderungen in Anschlusssegmenten im gleichen Eingriff adressiert werden sollten. Die Länge einer Fusion gilt jedoch als Risikofaktor für eine ASD[83], was sich auch im untersuchten kollektiv Erkennen lässt: Patienten mit ASD im Verlauf erhielten zu 75% einen bi- oder multisegmentalen Eingriff, in der Vergleichsgruppe lag der Anteil hingegen bei 68,5%. Es ist also eine Abwägung zwischen dem einschließen möglichst weniger Segmente und dem adressieren weiterer Pathologien notwendig, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen und eine Revision zu vermeiden. Diese scheint nämlich im untersuchten Kollektiv ebenfalls mit dem Auftreten einer ASD vergesellschaftet zu sein. Zu 25% stellte der Eingriff, welchem eine ASD folgte eine Revision dar. In der Vergleichsgruppe war dies in 20,7% der Fall.

Wie in Kapitel 2.5.2 bereits beschrieben, ist eine geläufige Theorie, dass die Anschlusssegmente durch eine Fusion der angrenzenden Segmente mehr belastet werden. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass ein höherer biomechanischer Anspruch an das Segment vorliegt, um die fusionsbedingte fehlende Beweglichkeit der Nachbarsegmente zu kompensieren, wodurch degenerative Veränderungen entstehen. Einen weiteren Einfluss auf die erhöhte Beweglichkeit eines Anschlusssegmentes stellten Cadoso et al. in einer biomechanischen in-vitro Studie dar. So führte die vollständige Laminektomie am LWK 5 nach dorsaler Instrumentierung des Segmentes L5/S1 zu einer Destabilisierung bei axialer Rotation und Flexion/Extension im kranialen Anschlusssegment[95]. Diese Ergebnisse decken sich mit den Tendenzen im hier vorliegenden Kollektiv. Bei Patienten mit ASD im Verlauf wurde häufiger eine vollständige Laminektomie durchgeführt, als in der Vergleichsgruppe (75% vs. 66,2%).

Eine geringere Schädigung der dorsalen Strukturen, wie der Lamina oder den Facettengelenken, scheint also hinsichtlich des Auftretens einer ASD protektiv zu sein. Das spiegelt sich auch in einer Arbeit von Min et al. wieder, in der Anschlusssegmentdegenerationen zu 44% nach ALIF und zu 82,6% nach PLIF beschrieben wurden[96]. Dies bestätigt sich in der hier untersuchten Gruppe dahingehend, dass keiner der Patienten, bei denen eine ASD auftrat, mittels ALIF versorgt wurde.

Der negative Einfluss eines pathologischen sagittalen Profils[86,93], welches ebenfalls zu einer Mehrbelastung des Anschlusssegmentes führt, konnte im untersuchten Kollektiv nicht bestätigt werden.
Auch die von Nakashima et al. als Risikofaktor beschriebene höhere Pelvic incidence[94] und der in einem Review von Tobert et al. abgeleitete große Einfluss von der spinopelvinen Parameter lässt sich in dieser Arbeit nicht reproduzieren[82].
Für die in dieser Arbeit untersuchten Parameter konnte allein für die relative Länge der in den LWK5 eingebrachten Schrauben eine statistische Signifikanz berechnet werden. Diese war bei Patienten, welche im Verlauf eine ASD entwickelten kürzer, als in der Vergleichsgruppe. Dies ist allenfalls dahingehend in die vorhandene Literatur einzuordnen, als dass eine Fusion ohne Instrumentierung häufiger zu einer ASD führt[120]. Für den Operateur leitet sich hieraus also ab, auf die ausreichende Länge der verwendeten Schrauben zu achten.

5.3 Schraubenlockerung

Auch wenn nicht jede Schraubenlockerung zu relevanten Beschwerden führt und eine Revision in nur wenigen Fällen notwendig ist, handelt es sich hierbei um eine Komplikation, deren Risikofaktoren im Rahmen der Therapieplanung und Durchführung des Eingriffes berücksichtigt werden sollte.
Im hier untersuchten Kollektiv waren Patienten, die eine Schraubenlockerung im Verlauf aufwiesen, signifikant älter als Patienten ohne diese Komplikation (64,6 Jahre vs. 55,7 Jahre). Trotz widersprüchlicher Aussagen in der Literatur[99,100] sollte bei Patienten höheren Alters die Indikation zur Operation entsprechend genauestens geprüft werden, auch wenn eventuell auftretende Beschwerden einer Schraubenlockerung möglicherweise nicht mehr erlebt werden. Besonders gilt dies für Patienten, welche zudem chronische Vorerkrankungen aufweisen, die im untersuchten Kollektiv ebenfalls mit Lockerungen assoziiert zu sein scheinen. Ein erhöhtes Risiko für Raucher geht aus den hier vorliegenden Daten hingegen nicht vor, was sich mit den Ergebnissen von Ohba et al. deckt[99].
Scheinbar widersprüchlich ist im untersuchten Kollektiv der im Mittel größere BMI und die im CT geringere Dicke des subkutanen Fettgewebes. Diese Diskrepanz ist möglicherweise auf die vorliegenden, eingeschränkte Datenlage zurückzuführen. Während Größe, Gewicht und somit auch der BMI bei nahezu allen Patienten erfasst werden konnten, lagen in vielen Fällen keine CT-Bilder vor.
Ein häufig beschriebener Risikofaktor ist das Vorliegen einer Osteoporose, Osteopenie oder verminderten Knochendichte[11,98,101]. Auch in der hier analysierten Patientengruppe

konnten diese als Risikofaktor identifiziert werden. Während bei 4,5% der Patienten mit Schraubenlockerung eine Osteoporose vorbeschrieben war, war dies bei keinem der Patienten ohne Schraubenlockerung der Fall. Deutlicher fallen die Ergebnisse bei der Knochendichte aus. Sowohl in LWK 5 als auch in SWK 1 war diese bei Patienten mit Schraubenlockerung niedriger, für den SWK 1 ist der Unterschied statistisch signifikant. Um dem Auftreten von Schraubenlockerungen entgegenzuwirken könnte etwa ein präoperatives Osteoporose-Screening erfolgen und eine entsprechende Therapie eingeleitet werden, um die Knochenqualität zu verbessern. Zudem könnten spezielle expandierbare Implantate, welche eine geringer Lockerungsrate aufweisen, oder zementaugmentierte Techniken verwendet werden[121,122].

Nicht nur die Knochenqualität, sondern auch die der Wirbelsäule umliegenden Muskulatur steht mit dem Auftreten von Schraubenlockerungen in Verbindung[102,103]. Die Ergebnisse einer erhöhten Lockerungsrate bei eingeschränkter Qualität des Musculus errector spinae konnten im hier vorliegenden Kollektiv reproduziert werden. Entsprechend sind Ansätze zu eruieren, die neben der Knochenqualität auch die Muskulatur stärken.

Dass der Eingriff bei ca. 40% der Patienten mit Schraubenlockerung im Verlauf eine Revision darstellte, bei denjenigen ohne diese Komplikation hingegen nur bei 14,3%, unterstreicht diese Ergebnisse. Sowohl die Muskulatur als auch die Pedikel und Wirbelkörper sind hier bereits vorgeschädigt. Entsprechend sollte hier ebenfalls eine Augmentation oder spezielle Implantate in Erwägung gezogen werden.

Auch biomechanische Faktoren wie eine sagittale Imbalance oder eine vergleichsweise vergrößerte Pelvic incidence (62,95° vs. 60,16°) sind im vorliegenden Kollektiv mit dem Auftreten von Schraubenlockerungen assoziiert und spiegeln die Ergebnisse anderer Arbeiten wieder[101,103].

Gleiches gilt für einige Faktoren, welche den Eingriff selbst betreffen. Patienten, welche eine Schraubenlockerung im Verlauf aufwiesen wurden in über 90 Prozent über das Segment L5/S1 hinaus instrumentiert bzw. fusioniert, während solche multisegmentalen Eingriffe lediglich bei ca. 60 Prozent der Patienten ohne Schraubenlockerung durchgeführt wurden. Auch wenn dies unter der Annahme, dass eine Verteilung der Last auf mehrere Schrauben zu einer geringeren Lockerungsrate führen sollte, zunächst widersprüchlich erscheint, so decken sich diese Ergebnisse mit der Literatur[12,102].

Auch ein größeres Ausmaß der Dekompression ist im hier untersuchten Kollektiv mit Schraubenlockerungen vergesellschaftet. Eine möglichst sparsame Resektion des Lamina ist somit anzustreben.

Der von Kim et al. als Risikofaktor beschriebene Einfluss einer kürzeren intraossären Länge der in den 1. SWK implantierten Schraube konnte im vorliegenden Kollektiv

ebenfalls nachvollzogen werden. So war die relative Schraubenlänge im LWK 5 bei Patienten mit Schraubenlockerung (86,35% vs. 88,26%) ebenso geringer wie der Anteil der bikortikal in den SWK-1 eingebrachten Schrauben. Ziel des Operateurs sollte also eine möglichst lange intraossäre bikortikale Schraubenlänge unter Schonung der ventral gelegenen Strukturen sein.
Ähnlich wie bei der ASD beobachtet, ist auch das Vorliegen einer Schraubenlockerung mit weiteren Komplikationen wie einer Pseudarthrose, ASD oder einem postoperativen Infekt vergesellschaftet.

5.4 Gemeinsame Risikofaktoren und Limitierungen

Es können aus dem untersuchten Kollektiv einige Risikofaktoren für das Entstehen einer Pseudarthrose, ASD oder Schraubenlockerung abgeleitet werden. Dabei ließen sich Faktoren identifizieren, die scheinbar die Genese aller drei Komplikationen beeinflussen. Beispielweise das Vorliegen chronischer Erkrankungen, multisegmentale Eingriffe, degenerative Veränderungen der Bandscheiben, Wirbelkörper und umliegenden Muskulatur, ein höheres Alter oder Eingriffe, die eine Revision darstellen. Die gemeinsamen Risikofaktoren könnten dabei eine Erklärung für das häufige gemeinsame Auftreten der Komplikationen darstellen.

Es ist jedoch festzuhalten, dass die Aussagekraft der hier beschriebenen Korrelationen und Assoziationen durch verschiedene Limitierungen eingeschränkt ist. So sind die Häufigkeiten der Komplikationen nicht repräsentativ, da gezielt Patienten in das Kollektiv aufgenommen wurden, welche eine Komplikation aufwiesen. Zudem sind die Datensätze aus diversen Gründen in vielen Fällen nicht vollständig.
Beispielsweise weil die entsprechenden Untersuchungen nicht durchgeführt wurden, oder außerhalb der Universitätsklinik Köln angefertigte Bilder nicht dauerhaft archiviert wurden. Außerdem gibt es Messungen, die verzugsweise an präoperativ angefertigten Bildern durchgeführt werden, in einigen Fällen jedoch an postoperativ entstandenen Bildern erfolgten. Ebenso verhält es sich mit Analysen, welche nach Möglichkeit an postoperativ erstellten Bildern durchgeführt wurden.
Darüber hinaus handelt es sich um eine retrospektive Arbeit, welche nicht verblindet durchgeführt wurde. Das Vorliegen einer Komplikation war bereits vor Erhebung der übrigen Parameter und Messungen bekannt.

Trotzdem geben die vorliegenden Daten Anhaltspunkte für Risikofaktoren bzw. potenzielle Risikofaktoren. In vielen Fällen waren die Ergebnisse mit der bestehenden Literatur vereinbar.

Zusammenfassend sind bei der Behandlung von Patienten mit Pathologien der Wirbelsäule am lumbosakralen Übergang neben dem Gesamtzustand des Patienten, Veränderungen der Wirbelsäule, das Ausmaß und die Technik des Eingriffs sowie das verwendete Material bei der Indikationsstellung, präoperativen Vorbereitung und Durchführung einer Fusion am lumbosakralen Übergangs zu berücksichtigen, um das Auftreten von Pseudarthrosen, ASD und Schraubenlockerungen zu minimieren.

Anmerkung

Zur besseren Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

6 Literaturverzeichnis

1. Lawrence RC, Felson DT, Helmick CG, et al. Estimates of the prevalence of arthritis and other rheumatic conditions in the United States. Part II. *Arthritis Rheum* 2008; **58**(1): 26-35.

2. Popescu A, Lee H. Neck Pain and Lower Back Pain. *Med Clin North Am* 2020; **104**(2): 279-92.

3. Koes BW, van Tulder MW, Thomas S. Diagnosis and treatment of low back pain. *BMJ* 2006; **332**(7555): 1430-4.

4. Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, et al. What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet* 2018; **391**(10137): 2356-67.

5. Martin BI, Mirza SK, Spina N, Spiker WR, Lawrence B, Brodke DS. Trends in Lumbar Fusion Procedure Rates and Associated Hospital Costs for Degenerative Spinal Diseases in the United States, 2004 to 2015. *Spine (Phila Pa 1976)* 2019; **44**(5): 369-76.

6. Chun DS, Baker KC, Hsu WK. Lumbar pseudarthrosis: a review of current diagnosis and treatment. *Neurosurg Focus* 2015; **39**(4): E10.

7. Rollinghoff M, Schluter-Brust K, Groos D, et al. Mid-range outcomes in 64 consecutive cases of multilevel fusion for degenerative diseases of the lumbar spine. *Orthop Rev (Pavia)* 2010; **2**(1): e3.

8. Raizman NM, O'Brien JR, Poehling-Monaghan KL, Yu WD. Pseudarthrosis of the spine. *J Am Acad Orthop Surg* 2009; **17**(8): 494-503.

9. Ondra SL, Marzouk S. Revision strategies for lumbar pseudarthrosis. *Neurosurg Focus* 2003; **15**(3): E9.

10. Radcliff KE, Kepler CK, Jakoi A, et al. Adjacent segment disease in the lumbar spine following different treatment interventions. *Spine J* 2013; **13**(10): 1339-49.

11. Marie-Hardy L, Pascal-Moussellard H, Barnaba A, Bonaccorsi R, Scemama C. Screw Loosening in Posterior Spine Fusion: Prevalence and Risk Factors. *Global Spine J* 2020; **10**(5): 598-602.

12. Bokov A, Bulkin A, Aleynik A, Kutlaeva M, Mlyavykh S. Pedicle Screws Loosening in Patients With Degenerative Diseases of the Lumbar Spine: Potential Risk Factors and Relative Contribution. *Global Spine J* 2019; **9**(1): 55-61.

13. Schmidt CO, Raspe H, Pfingsten M, et al. Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; **32**(18): 2005-11.

14. Baur-Melnyk A, Triantafyllou M, Birkenmaier C, Reiser M. [Degenerative diseases of the spine: Rare and often unrecognized causes of pain syndromes]. *Radiologe* 2006; **46**(6): 454-67.

15. Sattar MH, Guthrie ST. Anatomy, Back, Sacral Vertebrae. StatPearls. Treasure Island (FL); 2022.

16. Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, Labelle H. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech* 2005; **18**(1): 40-7.

17. Panjabi MM, Goel V, Oxland T, et al. Human lumbar vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine (Phila Pa 1976)* 1992; **17**(3): 299-306.

18. Waxenbaum JA, Reddy V, Williams C, Futterman B. Anatomy, Back, Lumbar Vertebrae. StatPearls. Treasure Island (FL); 2022.

19. Hukins DW, Kirby MC, Sikoryn TA, Aspden RM, Cox AJ. Comparison of structure, mechanical properties, and functions of lumbar spinal ligaments. *Spine (Phila Pa 1976)* 1990; **15**(8): 787-95.

20. Willburger RE, Kramer J, Wiese M. [Surgical anatomy of the lumbar spine]. *Orthopade* 2005; **34**(10): 970-5.

21. Cheng JS, Song JK. Anatomy of the sacrum. *Neurosurg Focus* 2003; **15**(2): E3.

22. Roberts S, Evans H, Trivedi J, Menage J. Histology and pathology of the human intervertebral disc. *J Bone Joint Surg Am* 2006; **88 Suppl 2**: 10-4.

23. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Prometheus - LernAtlas der Anatomie : allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: Stuttgart ; New York : Georg Thieme Verlag; 2011.

24. Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, McEnery KW. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine (Phila Pa 1976)* 1995; **20**(12): 1351-8.

25. Legaye J, Duval-Beaupere G, Hecquet J, Marty C. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998; **7**(2): 99-103.

26. Le Huec JC, Thompson W, Mohsinaly Y, Barrey C, Faundez A. Sagittal balance of the spine. *Eur Spine J* 2019; **28**(9): 1889-905.

27. Barrey C, Jund J, Noseda O, Roussouly P. Sagittal balance of the pelvis-spine complex and lumbar degenerative diseases. A comparative study about 85 cases. *Eur Spine J* 2007; **16**(9): 1459-67.

28. Barrey C, Roussouly P, Le Huec JC, D'Acunzi G, Perrin G. Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine. *Eur Spine J* 2013; **22 Suppl 6**: S834-41.

29. Gallucci M, Limbucci N, Paonessa A, Splendiani A. Degenerative disease of the spine. *Neuroimaging Clin N Am* 2007; **17**(1): 87-103.

30. Schmidt KI, Viera J, Reith W. [Degenerative diseases of the spine]. *Radiologe* 2011; **51**(9): 779-83.

31. Arabmotlagh M, Sellei RM, Vinas-Rios JM, Rauschmann M. [Classification and diagnosis of lumbar spinal stenosis]. *Orthopade* 2019; **48**(10): 816-23.

32. Benzakour T, Igoumenou V, Mavrogenis AF, Benzakour A. Current concepts for lumbar disc herniation. *Int Orthop* 2019; **43**(4): 841-51.

33. Amin RM, Andrade NS, Neuman BJ. Lumbar Disc Herniation. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2017; **10**(4): 507-16.

34. Leone A, Cianfoni A, Cerase A, Magarelli N, Bonomo L. Lumbar spondylolysis: a review. *Skeletal Radiol* 2011; **40**(6): 683-700.

35. Verhagen AP, Downie A, Popal N, Maher C, Koes BW. Red flags presented in current low back pain guidelines: a review. *Eur Spine J* 2016; **25**(9): 2788-802.

36. Clohisy DR, Mantyh PW. Bone cancer pain. *Clin Orthop Relat Res* 2003; (415 Suppl): S279-88.

37. Pishnamaz M, Quack V, Herren C, Hildebrand F, Kobbe P. [Treatment strategies for pathological fractures of the spine]. *Unfallchirurg* 2021; **124**(9): 720-30.

38. Ecker RD, Endo T, Wetjen NM, Krauss WE. Diagnosis and treatment of vertebral column metastases. *Mayo Clin Proc* 2005; **80**(9): 1177-86.

39. Laufer I, Rubin DG, Lis E, et al. The NOMS framework: approach to the treatment of spinal metastatic tumors. *Oncologist* 2013; **18**(6): 744-51.

40. Ballane G, Cauley JA, Luckey MM, El-Hajj Fuleihan G. Worldwide prevalence and incidence of osteoporotic vertebral fractures. *Osteoporos Int* 2017; **28**(5): 1531-42.

41. Prost S, Pesenti S, Fuentes S, Tropiano P, Blondel B. Treatment of osteoporotic vertebral fractures. *Orthop Traumatol Surg Res* 2021; **107**(1S): 102779.

42. Wood KB, Li W, Lebl DR, Ploumis A. Management of thoracolumbar spine fractures. *Spine J* 2014; **14**(1): 145-64.

43. Wood K, Buttermann G, Mehbod A, Garvey T, Jhanjee R, Sechriest V. Operative compared with nonoperative treatment of a thoracolumbar burst fracture without neurological deficit. A prospective, randomized study. *J Bone Joint Surg Am* 2003; **85**(5): 773-81.

44. Frangen TM, Kalicke T, Gottwald M, et al. [Surgical management of spondylodiscitis. An analysis of 78 cases]. *Unfallchirurg* 2006; **109**(9): 743-53.

45. Butler JS, Shelly MJ, Timlin M, Powderly WG, O'Byrne JM. Nontuberculous pyogenic spinal infection in adults: a 12-year experience from a tertiary referral center. *Spine (Phila Pa 1976)* 2006; **31**(23): 2695-700.

46. Jensen AG, Espersen F, Skinhoj P, Rosdahl VT, Frimodt-Moller N. Increasing frequency of vertebral osteomyelitis following Staphylococcus aureus bacteraemia in Denmark 1980-1990. *J Infect* 1997; **34**(2): 113-8.

47. Mylona E, Samarkos M, Kakalou E, Fanourgiakis P, Skoutelis A. Pyogenic vertebral osteomyelitis: a systematic review of clinical characteristics. *Semin Arthritis Rheum* 2009; **39**(1): 10-7.

48. Sobottke R, Seifert H, Fatkenheuer G, Schmidt M, Gossmann A, Eysel P. Current diagnosis and treatment of spondylodiscitis. *Dtsch Arztebl Int* 2008; **105**(10): 181-7.

49. Zarghooni K, Rollinghoff M, Sobottke R, Eysel P. Treatment of spondylodiscitis. *Int Orthop* 2012; **36**(2): 405-11.

50. Chen WH, Jiang LS, Dai LY. Surgical treatment of pyogenic vertebral osteomyelitis with spinal instrumentation. *Eur Spine J* 2007; **16**(9): 1307-16.

51. Duarte RM, Vaccaro AR. Spinal infection: state of the art and management algorithm. *Eur Spine J* 2013; **22**(12): 2787-99.

52. Small SA, Perron AD, Brady WJ. Orthopedic pitfalls: cauda equina syndrome. *Am J Emerg Med* 2005; **23**(2): 159-63.

53. Gitelman A, Hishmeh S, Morelli BN, et al. Cauda equina syndrome: a comprehensive review. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2008; **37**(11): 556-62.

54. Dick W. Internal fixation of thoracic and lumbar spine fractures: Hans Huber Pub; 1989.

55. Magerl F, Aebi M, Gertzbein S, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *European Spine Journal* 1994; **3**(4): 184-201.

56. Perna F, Borghi R, Pilla F, Stefanini N, Mazzotti A, Chehrassan M. Pedicle screw insertion techniques: an update and review of the literature. *Musculoskelet Surg* 2016; **100**(3): 165-9.

57. Große-Leege H, Winker KH. Operative Behandlung von Wirbelfrakturen-dorsale Instrumentierung. *OP-JOURNAL* 2001; **17**(02): 156-60.

58. Briggs H, Milligan PR. Chip fusion of the low back following exploration of the spinal canal. *JBJS* 1944; **26**(1): 125-30.

59. Jaslow IA. Colles fracture; a review of treatment. *Guthrie Clin Bull* 1946; **15**: 81-4.

60. Cloward RB. The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. *J Neurosurg* 1953; **10**(2): 154-68.

61. Fleege C, Rickert M, Rauschmann M. [The PLIF and TLIF techniques. Indication, technique, advantages, and disadvantages]. *Orthopade* 2015; **44**(2): 114-23.

62. Mobbs RJ, Phan K, Malham G, Seex K, Rao PJ. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *J Spine Surg* 2015; **1**(1): 2-18.

63. Schnake KJ, Rappert D, Storzer B, Schreyer S, Hilber F, Mehren C. [Lumbar fusion-Indications and techniques]. *Orthopade* 2018.

64. Harms J, Rolinger H. Die operative Behandlung der Spondylolisthese durch dorsale Aufrichtung und ventrale Verblockung. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 1982; **120**(03): 343-7.

65. de Kunder SL, van Kuijk SMJ, Rijkers K, et al. Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) versus posterior lumbar interbody fusion (PLIF) in lumbar spondylolisthesis: a systematic review and meta-analysis. *Spine J* 2017; **17**(11): 1712-21.

66. Capener N. Spondylolisthesis. 1932.

67. Larsen JM, Capen DA. Pseudarthrosis of the Lumbar Spine. *J Am Acad Orthop Surg* 1997; **5**(3): 153-62.

68. DePalma AF, Rothman RH. The nature of pseudarthrosis. *Clin Orthop Relat Res* 1968; **59**: 113-8.

69. Kornblum MB, Fischgrund JS, Herkowitz HN, Abraham DA, Berkower DL, Ditkoff JS. Degenerative lumbar spondylolisthesis with spinal stenosis: a prospective long-term study comparing fusion and pseudarthrosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; **29**(7): 726-33; discussion 33-4.

70. Adogwa O, Verla T, Thompson P, et al. Affective disorders influence clinical outcomes after revision lumbar surgery in elderly patients with symptomatic adjacent-segment disease, recurrent stenosis, or pseudarthrosis: clinical article. *J Neurosurg Spine* 2014; **21**(2): 153-9.

71. Carpenter CT, Dietz JW, Leung KY, Hanscom DA, Wagner TA. Repair of a pseudarthrosis of the lumbar spine. A functional outcome study. *J Bone Joint Surg Am* 1996; **78**(5): 712-20.

72. Jenkins LT, Jones AL, Harms JJ. Prognostic factors in lumbar spinal fusion. *Contemp Orthop* 1994; **29**(3): 173-80.

73. Macki M, Syeda S, Rajjoub KR, et al. The Effect of Smoking Status on Successful Arthrodesis After Lumbar Instrumentation Supplemented with rhBMP-2. *World Neurosurg* 2017; **97**: 459-64.

74. Deguchi M, Rapoff AJ, Zdeblick TA. Posterolateral fusion for isthmic spondylolisthesis in adults: analysis of fusion rate and clinical results. *J Spinal Disord* 1998; **11**(6): 459-64.

75. Dimar JR, 2nd, Ante WA, Zhang YP, Glassman SD. The effects of nonsteroidal anti-inflammatory drugs on posterior spinal fusions in the rat. *Spine (Phila Pa 1976)* 1996; **21**(16): 1870-6.

76. Sawin PD, Dickman CA, Crawford NR, Melton MS, Bichard WD, Sonntag VK. The effects of dexamethasone on bone fusion in an experimental model of posterolateral lumbar spinal arthrodesis. *J Neurosurg* 2001; **94**(1 Suppl): 76-81.

77. Han SH, Hyun SJ, Jahng TA, Kim KJ. A Comparative Radiographic Analysis of Fusion Rate between L4-5 and L5-S1 in a Single Level Posterior Lumbar Interbody Fusion. *Korean J Spine* 2015; **12**(2): 60-7.

78. Cleveland M, Bosworth DM, Thompson FR. Pseudarthrosis in the lumbosacral spine. *J Bone Joint Surg Am* 1948; **30A**(2): 302-12.

79. Buttermann GR, Glazer PA, Hu SS, Bradford DS. Revision of failed lumbar fusions. A comparison of anterior autograft and allograft. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; **22**(23): 2748-55.

80. Virk SS, Niedermeier S, Yu E, Khan SN. Adjacent segment disease. *Orthopedics* 2014; **37**(8): 547-55.

81. Glattes RC, Bridwell KH, Lenke LG, Kim YJ, Rinella A, Edwards C, 2nd. Proximal junctional kyphosis in adult spinal deformity following long instrumented posterior spinal fusion: incidence, outcomes, and risk factor analysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005; **30**(14): 1643-9.

82. Tobert DG, Antoci V, Patel SP, Saadat E, Bono CM. Adjacent Segment Disease in the Cervical and Lumbar Spine. *Clin Spine Surg* 2017; **30**(3): 94-101.

83. Sears WR, Sergides IG, Kazemi N, Smith M, White GJ, Osburg B. Incidence and prevalence of surgery at segments adjacent to a previous posterior lumbar arthrodesis. *Spine J* 2011; **11**(1): 11-20.

84. Hilibrand AS, Robbins M. Adjacent segment degeneration and adjacent segment disease: the consequences of spinal fusion? *Spine J* 2004; **4**(6 Suppl): 190S-4S.

85. Mok JM, Cloyd JM, Bradford DS, et al. Reoperation after primary fusion for adult spinal deformity: rate, reason, and timing. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009; **34**(8): 832-9.

86. Djurasovic MO, Carreon LY, Glassman SD, Dimar JR, 2nd, Puno RM, Johnson JR. Sagittal alignment as a risk factor for adjacent level degeneration: a case-control study. *Orthopedics* 2008; **31**(6): 546.

87. Min JH, Jang JS, Jung B, et al. The clinical characteristics and risk factors for the adjacent segment degeneration in instrumented lumbar fusion. *J Spinal Disord Tech* 2008; **21**(5): 305-9.

88. Okuda S, Iwasaki M, Miyauchi A, Aono H, Morita M, Yamamoto T. Risk factors for adjacent segment degeneration after PLIF. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; **29**(14): 1535-40.

89. Lee CS, Hwang CJ, Lee SW, et al. Risk factors for adjacent segment disease after lumbar fusion. *Eur Spine J* 2009; **18**(11): 1637-43.

90. Ghiselli G, Wang JC, Bhatia NN, Hsu WK, Dawson EG. Adjacent segment degeneration in the lumbar spine. *J Bone Joint Surg Am* 2004; **86**(7): 1497-503.

91. Throckmorton TW, Hilibrand AS, Mencio GA, Hodge A, Spengler DM. The impact of adjacent level disc degeneration on health status outcomes following lumbar fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 2003; **28**(22): 2546-50.

92. Bae JS, Lee SH, Kim JS, Jung B, Choi G. Adjacent segment degeneration after lumbar interbody fusion with percutaneous pedicle screw fixation for adult low-grade isthmic spondylolisthesis: minimum 3 years of follow-up. *Neurosurgery* 2010; **67**(6): 1600-7; discussion 7-8.

93. Remes V, Lamberg T, Tervahartiala P, et al. Long-term outcome after posterolateral, anterior, and circumferential fusion for high-grade isthmic spondylolisthesis in children and adolescents: magnetic resonance imaging findings after average of 17-year follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 2006; **31**(21): 2491-9.

94. Nakashima H, Kawakami N, Tsuji T, et al. Adjacent Segment Disease After Posterior Lumbar Interbody Fusion: Based on Cases With a Minimum of 10 Years of Follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 2015; **40**(14): E831-41.

95. Cardoso MJ, Dmitriev AE, Helgeson M, Lehman RA, Kuklo TR, Rosner MK. Does superior-segment facet violation or laminectomy destabilize the adjacent level in lumbar

transpedicular fixation? An in vitro human cadaveric assessment. *Spine (Phila Pa 1976)* 2008; **33**(26): 2868-73.

96. Min JH, Jang JS, Lee SH. Comparison of anterior- and posterior-approach instrumented lumbar interbody fusion for spondylolisthesis. *J Neurosurg Spine* 2007; **7**(1): 21-6.

97. McAfee PC, Weiland DJ, Carlow JJ. Survivorship analysis of pedicle spinal instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)* 1991; **16**(8 Suppl): S422-7.

98. Bredow J, Boese CK, Werner CM, et al. Predictive validity of preoperative CT scans and the risk of pedicle screw loosening in spinal surgery. *Arch Orthop Trauma Surg* 2016; **136**(8): 1063-7.

99. Ohba T, Ebata S, Oba H, Koyama K, Haro H. Risk Factors for Clinically Relevant Loosening of Percutaneous Pedicle Screws. *Spine Surg Relat Res* 2019; **3**(1): 79-85.

100. Wu JC, Huang WC, Tsai HW, et al. Pedicle screw loosening in dynamic stabilization: incidence, risk, and outcome in 126 patients. *Neurosurg Focus* 2011; **31**(4): E9.

101. Yuan L, Zhang X, Zeng Y, Chen Z, Li W. Incidence, Risk, and Outcome of Pedicle Screw Loosening in Degenerative Lumbar Scoliosis Patients Undergoing Long-Segment Fusion. *Global Spine J* 2021: 21925682211017477.

102. Wang W, Li W, Chen Z. Risk factors for screw loosening in patients with adult degenerative scoliosis: the importance of paraspinal muscle degeneration. *J Orthop Surg Res* 2021; **16**(1): 448.

103. Kim JB, Park SW, Lee YS, Nam TK, Park YS, Kim YB. The Effects of Spinopelvic Parameters and Paraspinal Muscle Degeneration on S1 Screw Loosening. *J Korean Neurosurg Soc* 2015; **58**(4): 357-62.

104. Saklad M, M.D. GRADING OF PATIENTS FOR SURGICAL PROCEDURES. *Anesthesiology: The Journal of the American Society of Anesthesiologists* 1941; **2**(3): 281-4.

105. Dripps RD, Lamont A, Eckenhoff JE. The Role of Anesthesia in Surgical Mortality. *JAMA* 1961; **178**(3): 261-6.

106. Mayhew D, Mendonca V, Murthy BVS. A review of ASA physical status - historical perspectives and modern developments. *Anaesthesia* 2019; **74**(3): 373-9.

107. ASA House of Delegates. ASA Physical Status Classification System. 2014. https://www.asahq.org/resources/clinical-information/asa-physical-status-classification-system (accessed 07.02.2020.

108. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. *Eur Spine J* 2011; **20 Suppl 5**: 609-18.

109. Leahy S, Toomey C, McCreesh K, O'Neill C, Jakeman P. Ultrasound measurement of subcutaneous adipose tissue thickness accurately predicts total and segmental body fat of young adults. *Ultrasound Med Biol* 2012; **38**(1): 28-34.

110. Lenz M, Meyer C, Boese CK, Siewe J, Eysel P, Scheyerer MJ. The impact of obesity measured by outer abdominal fat on instability of the adjacent segments after rigid pedicle screw fixation. *Orthop Rev (Pavia)* 2018; **10**(2): 7684.

111. DenOtter TD, Schubert J. Hounsfield Unit. StatPearls. Treasure Island (FL); 2022.

112. Aydin Ozturk P, Arac E, Ozturk U, Arac S. Estimation of bone mineral density with hounsfield unit measurement. *Br J Neurosurg* 2021: 1-4.

113. Pfirrmann CW, Metzdorf A, Zanetti M, Hodler J, Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine (Phila Pa 1976)* 2001; **26**(17): 1873-8.

114. Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS, Carter JR. Imaging of degenerative disk disease. *Radiology* 1988; **168**(1): 177-86.

115. Modic MT, Steinberg PM, Ross JS, Masaryk TJ, Carter JR. Degenerative disk disease: assessment of changes in vertebral body marrow with MR imaging. *Radiology* 1988; **166**(1 Pt 1): 193-9.

116. Goutallier D, Postel JM, Bernageau J, Lavau L, Voisin MC. Fatty muscle degeneration in cuff ruptures. Pre- and postoperative evaluation by CT scan. *Clin Orthop Relat Res* 1994; (304): 78-83.

117. Fuchs B, Weishaupt D, Zanetti M, Hodler J, Gerber C. Fatty degeneration of the muscles of the rotator cuff: assessment by computed tomography versus magnetic resonance imaging. *J Shoulder Elbow Surg* 1999; **8**(6): 599-605.

118. Panjabi MM, White AA, 3rd. Basic biomechanics of the spine. *Neurosurgery* 1980; **7**(1): 76-93.

119. Souslian FG, Patel PD. Review and analysis of modern lumbar spinal fusion techniques. *Br J Neurosurg* 2021: 1-7.

120. Park P, Garton HJ, Gala VC, Hoff JT, McGillicuddy JE. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; **29**(17): 1938-44.

121. Wu ZX, Gong FT, Liu L, et al. A comparative study on screw loosening in osteoporotic lumbar spine fusion between expandable and conventional pedicle screws. *Arch Orthop Trauma Surg* 2012; **132**(4): 471-6.

122. Burval DJ, McLain RF, Milks R, Inceoglu S. Primary pedicle screw augmentation in osteoporotic lumbar vertebrae: biomechanical analysis of pedicle fixation strength. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; **32**(10): 1077-83.

7 Anhang

Tests auf Normalverteilung

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Alter zum OP-Zeitpunkt	,197	9	,200	,909	9	,307
Größe	,151	9	,200	,954	9	,735
Gewicht	,175	9	,200	,934	9	,517
BMI	,149	9	,200*	,977	9	,944
HU L5	,228	9	,195	,912	9	,332
HU S1	,200	9	,200*	,930	9	,482
Dicke Fettgewebe	,184	9	,200*	,948	9	,672
LWS-Lordose	,160	9	,200*	,960	9	,802
Thorakale Kyphose	,188	9	,200*	,945	9	,632
Thorakolumbale Kyphose	,099	9	,200*	,994	9	,999
Pelvic incidence	,183	9	,200*	,936	9	,545
Sacral slope	,152	9	,200*	,973	9	,917
Pelvic tilt	,216	9	,200*	,917	9	,372
Overhang	,169	9	,200*	,959	9	,784
Tiefe L5/BK	,202	9	,200*	,875	9	,138
Bandscheibenhöhe	,314	9	,011	,748	9	,005
Relative Schraubenlänge	,234	9	,166	,928	9	,461

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tabelle 22: Tests auf Normalverteilung (generiert in SPSS)